# PETROLEUM RESEARCH

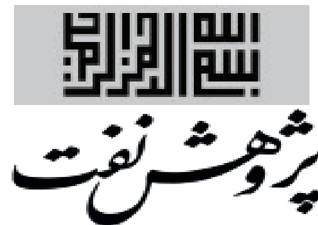
2022(October-November)
Volume 32 \ Serial Number 125 \ ISSN 2345-2900



دوماهنامه علمی-پژوهشی، سال سی و دوم، شماره مسلسل ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱

# پژوهش نفت

دوماهنامه علمی-پژوهشی/سال سی و دوم/شماره مسلسل ۱۲۵
مهر و آبان ۱۴۰۱




**دوماهنامه علمی- پژوهشی**

سال سی و دوم، شماره ۱۲۵

مهر و آبان ۱۴۰۱

صاحب امتیاز: پژوهشگاه صنعت نفت
مدیر مسئول: جعفر توفیقی
سردبیر: محمدرضا احسانی
مدیر اجرایی: طیبه مرادیان
ویراستار: فرهاد رحمانی چیانه
صفحه‌آرایی: نفیسه دلدار و پری‌ناز نوری
**چاپ، لیتوگرافی و صحافی:** چاپ گنجینه مینیاتور

**هیأت تحریریه:**
محمدرضا احسانی، استاد دانشگاه صنعتی اصفهان
حمیدرضا آقابزرگ، استاد پژوهشگاه صنعت نفت
محمدرضا امیدخواه، استاد دانشگاه تربیت مدرس
داریوش باستانی، استاد دانشگاه صنعتی شریف
جعفر توفیقی، استاد دانشگاه تربیت مدرس
محمدرضا جعفری‌نصر، استاد پژوهشگاه صنعت نفت
ترانه جعفری بهبهانی، دانشیار پژوهشگاه صنعت نفت
احسان خامه‌چی، استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر
فرهاد خراشه، استاد دانشگاه صنعتی شریف
فریبرز رشیدی، استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر
علیمراد رشیدی، استاد پژوهشگاه صنعت نفت
رضا رضایی، استاد دانشگاه کرتین استرالیا
علی‌اکبر سیف‌کردی، استاد دانشگاه صنعتی شریف
علی کدخدایی ایلخچی، دانشیار دانشگاه تبریز
محمدرضا کمالی، استاد دانشگاه ادیث کاوان استرالیا
فرهاد عین مظفری، استاد دانشگاه رایرسون کانادا
محمدحسین غضنفری، دانشیار دانشگاه صنعتی شریف
محسن مسیحی، استاد دانشگاه صنعتی شریف
مهراب مهرور، استاد دانشگاه رایرسون کانادا
سیدرضا موسوی حرمی، استاد دانشگاه فردوسی مشهد
محسن نصر اصفهانی، استاد دانشگاه صنعتی اصفهان
مهدی نکومنش، استاد پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران
ابراهیم واشقانی فراهانی، استاد دانشگاه تربیت مدرس
شاپور وثوقی، استاد دانشگاه کانزاس آمریکا
منوچهر وثوقی، استاد دانشگاه صنعتی شریف

**داوران این شماره:**
محمدرضا احسانی (دانشگاه صنعتی اصفهان)
محمد حسین اقبال احمدی (دانشگاه تفرش)
حمیدرضا آقابزرگ (دانشگاه تربیت مدرس)
بیتا آیتی (دانشگاه تربیت مدرس)
مهناز پورخلیل (پژوهشگاه صنعت نفت)
محمودرضا پیشوایی (دانشگاه صنعتی شریف)
مریم تخت‌روانچی (شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی)
بهرام حبیب‌نیا (دانشگاه صنعت نفت)
مسعود حق‌شناس‌فرد (دانشگاه صنعتی اصفهان)
علیرضا خزعلی (دانشگاه صنعتی اصفهان)
محمدرحمانی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)
علیمراد رشیدی (پژوهشگاه صنعت نفت)
فریبرز رشیدی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)
امیرحسین سعیدی دهاقانی (دانشگاه تربیت مدرس)
محمدعلی صالحی (دانشگاه اصفهان)
شکوفه طیبی (پژوهشگاه صنعت نفت)
قاسم عقلی (دانشگاه فردوسی مشهد)
محمدحسین غضنفری (دانشگاه صنعتی شریف)
سیدمبین فاطمی (دانشگاه صنعتی شریف)
مجتبی قائدی (دانشگاه شیراز)
رحیم کدخدایی (دانشگاه صنعتی تبریز)
حسن ماهانی (دانشگاه صنعتی شریف)
اسداله محبوبی (دانشگاه فردوسی مشهد)
بهرام موحد (شرکت CAPE)
محسن نصراصفهانی (دانشگاه صنعتی اصفهان)

**آدرس:**
تهران، بلوار غربی مجموعه ورزشی آزادی، پژوهشگاه صنعت نفت، دفتر مجله پژوهش نفت
صندوق پستی: ۱۳۷-۱۴۶۶۵
تلفن: ۴۸۲۵۲۱۲۹ و ۴۸۲۵۳۲۶۳ نمابر: ۴۴۷۳۹۷۱۲

وبگاه اینترنتی http://journals.ripi.ir

شماره پروانه انتشار: ۱۰۲/۷۹۹۲
ISSN ۲۳۴۵-۲۹۰۰

•مجله پژوهش نفت در پایگاه‌های زیر نمایه می‌شود:
•پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC)، (www.isc.gov.ir)
•اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (www.sid.ir)
•بانک اطلاعات نشریات کشور (www.magiran.com)
• DOAJ: (www.doaj.org/)
•Chemical Abstracts Service (CAS): (www.cas.org)
•Indexcopernicus: (www. indexcopernicus.com)
•WorldCat: (www.worldcat.org)
•Leibniz Information Centre for Science and Technology (TIB): (www.tib.eu)

پژوهش نفت
دوماهنامه علمی- پژوهشی
سال سی و دوم، شماره ۱۲۵
مهر و آبان ۱۴۰۱

## فهرست عناوین

# بررسی نسبت گرانروی سیال تزریقی و سیال مخزنی در پیش‌بینی زمان‌برون‌زد با استفاده از مفاهیم تراوش

سارا شکراله زاده بهبهانی، محسن مسیحی* و محمدحسین غضنفری
دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴

## چکیده

زمان‌برون‌زد سیال تزریقی در فرآیند تزریق آب یک معیار عملکرد مخزن است که تحت تاثیر موقعیت و عملیات چاه است. پیش‌بینی این زمان‌برون‌زد برای طراحی فرآیند و الگوهای تزریق در توسعه مخزن مفید است. روش متعارف برای این کار شبیه‌سازی مخزن بوده که که وقتی توزیع زمان‌برونزد مورد نظر باشد این کار بسیار زمان‌بر است.یک روش جایگزین در تعیین سریع زمان‌برون‌زد استفاده از رویکرد تئوری پرکولاسیون است. در این روش با استفاده از برخی خصوصیات مخزنی موجود مانند نسبت خالص به ناخالص، و ابعاد مخزن، امکان پیش‌بینی سریع نمودار توزیع زمان‌برون‌زد وجود دارد. به هرحال، برخی فرضیات لحاظ شده در توسعه اولیه رابطه مقیاس‌بندی توزیع زمان‌برون‌زد مانند فرض برابری گرانروی دو سیال تزریقی و تولیدی کاربردهای میدانی آنرا محدود نموده است. به منظور بسط کاربرد روابط مقیاس‌بندی زمان‌برونزد لازم است اثرات گرانروی متفاوت دو سیال بر روابط مقیاس‌بندی زمان‌برون‌زد دیده شود. به‌طور خاص از یک رویکرد بدون بعدسازی زمان‌برون‌زد بر مبنای زمان مشخصه بی‌بعد استفاده می شود. با اجرای شبیه‌سازی‌های مختلف جریان در مخزن تأثیر تغییرات گرانروی فازها بر زمان‌برون‌زد بررسی گردید. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد زمان مشخصه مناسب در رابطه مقیاس‌بندی زمان‌برونزد وابستگی به درجه اشغال شدگی و نسبت گرانروی دو فاز به فرم یک رابطه توانی با توان ۱/۳ دارد. لذا با تعمیم رابطه توزیع زمان‌برون‌زد با در نظر گرفتن این وابستگی توانی پیش‌بینی زمان‌برون‌زد سیال تزریقی در چاه تولیدی مخزن با دقت قابل قبولی امکان پذیر است. در انتها با پیاده‌سازی این رویکرد در یک مخزن واقعی و مقایسه نتایج زمان‌برون‌زد با نتایج شبیه‌سازی‌های تجاری به اعتبارسنجی رابطه تعمیم داده شده برای زمان‌برون‌زد تعمیم داده شده پرداخته شد.

**کلمات کلیدی: گرانروی، مفهوم تراوش، تزریق آب، زمان‌برون‌زد ، محیط متخلخل مخزن**

## مقدمه

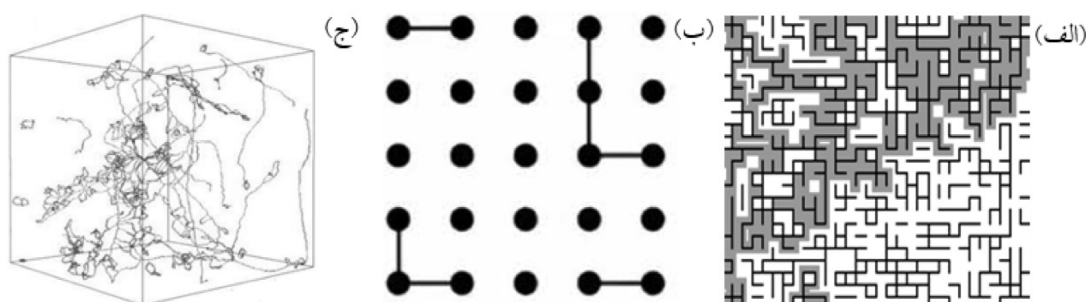
تراوش[1] به عبور سیال از یک فیلتر اطلاق می‌شود. این سیال می‌تواند مایع، گاز، جریان برق، حرارت، نور، عامل بیماری‌زا و غیره باشد. فیلتر نیز می‌تواند یک محیط متخلخل باشد. این فیلتر سیالات درون مخزن را از خود عبور می‌دهد [۱].

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی masihi@sharif.edu
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4570.3060)

1. Percolation

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶-۳

جریان سیال در یک محیط متخلخل تحت تأثیر نیروهای وارده بوده و با حرکت در مسیر پیش روی حرکت خود، به مسیرهای مختلف منحرف و منشعب شده و گسترش می‌یابد. کوتاه‌ترین مسیر می‌تواند کنترل‌کننده زمان‌برونزد (اولین مشاهده) سیال تزریقی در نقطه هدف باشد. اولین لحظه (با کمترین اندازه خوشه) که در آن ارتباط دو سوی محیط متخلخل توسط سیال تزریقی برقرار می‌گردد، آستانه پرکولاسیون ($p_c$) نامیده می‌شود. در تئوری پرکولاسیون؛ این آستانه به شکل بدون بعد گزارش شده و نشان می‌دهد حداقل چه کسری از حفرات بایستی اشغال شوند تا برای اولین بار جریان در کل سیستم برقرار گردد. لذا اگر احتمال اشغال شدن یک حفره p باشد، قبل از حد آستانه ($p<p_c$) احتمال وجود چنین خوشه ای، صفر است. برای مقادیر پس از حد آستانه ($p>p_c$) احتمال وجود خوشه بی‌نهایت، برابر با یک است. با توجه به تصادفی بودن خصوصیات این‌چنین سیستمی (مثلاً اندازه حفرات یا مسیر سیال)، حالات بسیاری برای جریان ممکن است وجود داشته باشد. لذا، ابتدا یک جامعه آماری احتمالی از تحقق های ممکن (در این جا صدها شبیه‌سازی از مدل‌های تصادفی محیط متخلخل) تهیه می‌شود. سپس تخمین حد آستانه با محاسبه یک متوسط آماری به‌دست می‌آید که این تخمین با بررسی تعداد بسیار زیادی از حالات ممکن سیستم، تعیین می‌شود [۱ و ۲]. در مسئله این تحقیق، هنگام تزریق یک سیال به محیط متخلخل (مثلاً به منظور بازیافت ثانویه و با هدف نگهداشت فشار مخزن)، هرچه حجم سیال تزریقی بیشتر شود، توزیع اشباع سیال تزریقی در محیط متخلخل بیشتر شده و امکان برقراری ارتباط میان دو سمت سیستم (یعنی چاه تولیدی و چاه تزریقی) از طریق سیال تزریقی بیشتر خواهد شد [۳]. ارزیابی کمی مقدار حد آستانه (یا به عبارتی زمان‌برون‌زد سیال تزریقی) و تعیین رابطه بین میزان برقراری ارتباط (که به آن بهم‌پیوستگی هم گفته می‌شود) درون سیستم با توزیع اشباع سیال تزریقی با استفاده از نظریه پرکولاسیون انجام می‌گیرد [۴]. برای مثال سیال تمایل دارد از مسیر تراواتر عبور نماید و ممکن است مسیرهای باریک‌تر جاروب نشود یا در اثر تغییرات فشار و اشباع سیالات، یک فاز به دام افتاده و مسیرهایی از محیط مسدود گردند. در این حالت، ساختار هندسی جریان و خوشه‌ها آرایش جدیدی پیدا خواهند آورد [۵]. از نظریه پرکولاسیون در مقیاس میدانی، می‌توان برای تعیین زمان‌برون‌زد سیال تزریقی، بهترین فاصله میان‌چاهی[1]، میزان ارتباط استاتیک و دینامیک دو چاه با یکدیگر و رفتار تولیدی بعد از برون‌زد سیال در صورت تزریق در مخزن (مانند افت تولید نفت و افزایش برش آب در صورت تزریق آب) استفاده کرد [۶]. نمونه‌هایی از مدل‌های مختلف تصادفی پرکولاسیون در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند.




**شکل ۱** نمایش انواع مدل‌های تراوشی شبکه‌ای شامل مدل های دوبعدی الف) جایگاهی ب) باندی و ج) مدل سه‌بعدی

1. Inter-Well Spacing

هدف این مطالعه بررسی زمان‌بررسی زمان‌برون‌زد در مقیاس میدانی با استفاده از روابط پرکولاسیون بمنظور نزدیک نمودن پیش‌بینی‌های روش پرکولاسیون به رفتار واقعی مخازن هیدروکروبوری است. به‌طور خاص، تأثیر نسبت گرانروی سیال تزریقی به تولیدی بر این رابطه بررسی می شود. در ابتدا با فرض مدل‌های ساده روابط اولیه پرکولاسیون مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در ادامه برای بهبود پیش‌بینی‌ها، متغیرهای مخزنی وارد روابط پرکولاسیون می‌گردند. در هر مرحله مقایسه بر مبنای اجرای تعداد زیادی از شبیه‌سازی‌ها انجام می‌گیرد.

## رویکرد تراوش

اولین مطالعاتی که در آن از پرکولاسیون دینامیک برای مدل‌سازی جریان در محیط متخلخل استفاده شد مربوط به اوایل دهه هشتاد است که توسط دو گروه مستقل از هم انجام گرفت. در این مطالعات، محیط متخلخل ابتدا توسط یک فاز اشباع شده است که در ادامه توسط فاز تزریقی از حفرات بیرون رانده می‌شود [۷ و ۸]. دو محقق با بازنگری در شرایط مرزی مسئله و در نظر گرفتن به دام افتادن سیالات، قدم بزرگی در حوزه استفاده از تئوری پرکولاسیون در مهندسی نفت برداشتند. آن‌ها برای روش پیشنهادی خود برای نخستین بار، از نام "پرکولاسیون تهاجمی[1]" استفاده کردند. پرکولاسیون تهاجمی یک روش شبه‌پایا برای مدل‌سازی تزریق غیرامتزاجی تحت تأثیر نیروهای موینه (نیروهای چسبندگی[2] قابل اغماض) است [۹]. نتایج Wilkinson و Willemsen تنها براساس شبیه‌سازی بوده و فرم توانی مدل آن‌ها بدون تعبیر ریاضی ارائه شده بود. اما این روابط پس از انتشار به سرعت توسعه داده شد و بر مبنای قضیه‌های ریاضی به اثبات رسید [۱۰]. Bak و همکاران مطالعه‌ای انجام دادند که مجدداً برقراری رابطه توانی برای سیستم‌های تراوشی دینامیک اثبات شد [۱۱]. گرچه وجود رابطه توانی در این بررسی مشخص گردید اما در خصوص کلی بودن مقدار توان در این روابط و وابستگی آن به خصوصیات سیستم (از جمله اندازه سیستم) بحثی ارائه نشد. در مطالعه Bak و مطالعات بعدی توسط Dickman و Munoz، نشان داده شد که پدیده‌های مختلف در طبیعت که از تعادل خارج می‌شوند حین تغییر، به‌صورت خودجوش به سوی ایجاد یک حالت منظم پیش می‌روند. این تمایل به نظم بدون اعمال نیروی خارجی بوده و به این دلیل محققین دیگری نام این پدیده را حالت بحرانی خودسازمان‌یافته[3] نامیدند [۱۲]. از سال ۱۹۸۳ تا به امروز، لحظه برون‌زد سیال تزریقی (آستانه بحرانی اول) مورد بررسی قرار گرفته است اما لحظه رسیدن به اشباع باقی‌مانده نفت (آستانه دوم) بسیار کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۳]. (. همچنین به تازگی نحوه تعمیم روابط مقیاس‌بندی شده بر پایه تئوری تراوش در مقیاس حفره برای نمونه های تصاویر سی تی پیاده‌سازی گردید [۱۴]. که تا حد قابل قبولی پیش‌بینی‌های این رویکرد را تأیید می‌کند. نظریه پرکولاسیون برای بررسی عملیات تحریک چاه از طریق ایجاد شکاف‌های هیدرولیکی کاربرد دارد. در مطالعه Rui و همکاران، حد آستانه فشار که در آن، سیال تزریقی وارد سنگ متخلخل می‌شود مورد ارزیابی قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که آستانه ورود سیال به درون منافذ سنگ بستگی به تخلخل و تراوایی دارد و دو نوع سنگ با تخلخل یکسان و تراوایی متفاوت دارای حدود آستانه متفاوتند. در این بررسی، یک مخزن متراکم دوبعدی (با تخلخل ۸٪) که در آن عملیات تحریک چاه با تزریق آب انجام شده برای شبیه‌سازی (با نرم‌افزار تجاری CMG) شبیه‌سازی شد و نمودار دبی تولید نفت و تولید تجمعی نفت برحسب زمان مورد تحلیل قرار گرفت [۱۵].

1. Invasion
2. Viscous Forces
3. Self-Organized Criticality

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶-۳

از کاربردهای دیگر رویکرد تراوش در مقیاس میدانی، تخمین خصوصیات دینامیک جریان مانند زمان‌برونزد سیال تزریقی در چاه‌های تولیدی است. بررسی‌های اولیه توسط Andrade و Buldyrev و همکاران براساس شبیه‌سازی قدم تصادفی منجر به ارائه تابع توزیع زمان‌برونزد وابسته به درجه اشغال شدگی شد [۱۶ و ۱۷]. رویکرد مشابهی توسط گنجه قزوینی و همکاران برای وابستگی توزیع زمان‌برونزد به درجه اشغال شدگی محیط متخلخل و مقایسه نتایج آن با شبیه‌سازی جریان صورت گرفت [۱۸]. تعمیم رابطه ارائه زمان‌برونزد به شرایط میدانی نیازمند در نظر گرفتن هندسه جریان در مخزن بود که توسط شکراله زاده و همکاران با معرفی زمان مشخصه وابسته به هندسه جریان ارائه گردید [۱۹]. هم‌چنین صادق نژاد و همکاران به ارائه روش‌هایی برای تعمیم رویکرد پرکولاسیون برای دست‌یابی به برخی مشخصه های استاتیکی و دینامیکی مخازن در مقیاس میدانی مانند بهم پیوستگی بین چاه‌ها یا الگوی چاه‌ها پرداختند [۲۰-۲۲]. به‌طور خاص یکی از مقایسه‌های کاربردی برای تخمین زمان‌برونزد با به‌کارگیری روابط مقیاس‌بندی توزیع زمان‌برونزد سیال تزریقی در چاه تولیدی و مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان با نرم‌افزارهای تجاری در فرآیند سیلاب‌زنی توسط صادق نژاد و مسیحی ارائه گردید که تطابق نسبتاً خوبی را نشان می‌داد [۲۳]. البته مواردی مانند تفاوت گرانروی سیالات تزریقی و تولیدی و تفاوت نمودارهای تراوایی نسبی از نمودار خطی و تعیین استانه ای برای باینری‌سازی نقشه تراوایی مخزن از مسائلی است که در تعمیم رابطه مقیاس‌بندی زمان‌برونزد مؤثر است. براساس آنچه مطرح گردید روش پرکولاسیون در مهندسی نفت به‌صورت محدود استفاده شده است. این روش آماری نسبتاً جدید بوده و بیشتر استفاده آن نیز مربوط به مقیاس حفره است. جالب است که با وارد شدن به مقیاس حفره در عکس‌برداری از آن، محققین به این نتیجه رسیده‌اند که ارائه روابط برای پیش‌بینی در مقیاس حفره (برای مثال در رابطه با تراوایی، اشباع سیالات و غیره) ساختاری تصادفی دارد که به‌صورت قطعی قابل تعیین نیست و تنها با استفاده از روابط فیزیک آماری و استفاده از احتمالات می‌توان رابطه کلی برای بررسی رفتار دینامیک محیط متخلخل ارائه کرد. یکی از موارد جدید در این کار تحقیقاتی استفاده از مقیاس میدانی برای مطالعه است و از مدل‌هایی با مقیاس میدان و چاه تزریقی و تولیدی برای تهیه جامعه آماری استفاده شده است.

## روش تحقیق و رویکرد مدل‌سازی

Andrade و همکاران با در نظر گرفتن اندازه سیستم (L) و میزان اشغال‌شدگی جایگاه‌ها (p) به بررسی ثوابت روابط پرکولاسیون پرداختند. نتیجه مطالعه آن‌ها در قالب جدول ثوابت (که دارای مقادیر ثابت و کلی هستند) ارائه شد [۱۶]. در همان سال، King و همکاران در مطالعه دیگری، رابطه‌ای را برای زمان پس از برون‌زد سیال تزریقی در یک مخزن واقعی بررسی نمودند. نتیجه این بررسی رضایت‌بخش بود. در این مطالعه برای پیش‌بینی حجم تولید نفت پس از برون‌زد (V) رابطه ۱ پیشنهاد شد. این رابطه برحسب بعد فرکتالی backbone و زمان تولید نوشته شده است. توان β براساس نتایج شبیه‌سازی حدود۰/۶۳ ± ۰/۰۰۰۸ محاسبه شد [۱۷].

$$V\ (t \rightarrow \infty) \sim (\frac{r^{d_B}}{t})^{\beta} \quad (۱)$$

که در آن، t زمان‌برونزد و r فاصله بین دو نقطه تزریق و تولید و $d_B$ توان فرکتالی است. در مطالعه مذکور، رابطه پرکولاسیون برای مخازن نفتی تحت تزریق آب با فرمولاسیون کلی زیر ارائه شد [۱۷].

$$P(t_{br}\,|\,r,L,p) \sim \frac{1}{r^{d_t}}(\frac{t_{br}}{r^{d_t}})^{-g_t{'}} \exp(-a(\frac{t_{br}}{r^{d_t}})^{-\varphi}) \quad (۲)$$

$$\exp(-b(\frac{t_{br}}{L^{d_t}})^{\psi})\exp(\frac{-ct_{br}}{|p-p_c|^{-\nu d_t}})$$

متغیرهای رابطه فوق در جدول ۱ ارائه شده‌اند [۱۷].

**جدول ۱** تعریف متغیرهای رابطه ۱ پرکولاسیون [۱۷]

| P | $t_{br}$ | L | p | R | $p_c$ |
|---|---|---|---|---|---|
| احتمال زمان‌برون‌زد برای مخزنی دوبعدی با ابعاد $L^2$، میزان ضخامت خالص به ناخالص p و فاصله بین چاهی r، و زمان‌برون‌زد $t_{br}$ | زمان‌برون‌زد (بدون بعد) | طول مخزن (بدون بعد) | ضخامت کل به مفید | فاصله بین چاهی (بدون بعد) | حد آستانه (۰/۶۶۸) |

میـزان اشغال‌شـدگی p در مهندسـی نفـت معـادل بـا نسـبت خالـص بـه ناخالـص (NTG) اسـت. حـد آسـتانه یا $p_c$ بـرای انـواع شـبکه پرکولاسـیون مقادیـر مشـخص و ثابـت دارد (جـدول ۱) در مطالعـه حاضـر مخـزن دوبعـدی اسـت و نواحـی مخزنـی بـا تعریـف مـدل مربعی‌شـکل بـا قابلیـت هم‌پوشـانی تعریـف می‌گردنـد، مقـدار ثابـت حـد آسـتانه ($p_c$) برابـر ۰/۶۶۸ اسـت. بقیـه متغیرهـای رابطـه ۲ ثوابتـی هسـتند کـه بـرای مسـائل پرکلاسـیونی دو بعـد و سـه‌بعد بـه شـرح جـدول ۲ هسـتند.

رابطـه اصلـی پرکولاسـیون (رابطـه ۲) یـک رابطـه کلـی اسـت کـه در آن متغیرهـای محدود هندسـی وجـود دارد. بـه ایـن ترتیـب در میدانـی کـه آب تزریـق می‌گـردد تأثیـر تفـاوت گرانـروی آب و نفـت در ایـن رابطـه مشـاهده نمی‌شـود. لـذا وارد نمـودن تأثیـر مشـخصات سـنگ و سـیال (از جملـه تراوایـی نسـبی و گرانـروی) بایـد بـه نحـوی بـر مبنـای فیزیـک مسـئله، وارد روابـط گـردد [۱۷]. یـک ایـده بـرای وارد نمـودن ایـن متغیرهـا بـه رابطـه ۲ اسـتفاده از آن‌هـا بـرای بدون‌بعـد سـازی پارامترهـای رابطـه اسـت. بـرای بـدون بعدسـازی متغیرهـای مخزنـی و اسـتفاده در مـدل شـبیه‌سـاز از رابطـه زمـان بی‌بعـد مبتنـی بـر جریـان اسـتفاده شده‌اسـت. رابطـه بی‌بعـد پیشـنهادی براسـاس رابطـه دارسـی بـرای جریـان بـا هندسـه شـعاعی و خطـی بـه فـرم زیـر اسـت [۱۷].

$$t_s^{radial}=\frac{c_2\phi p\mu r_s^2\ln(r_s/r_w)}{K\Delta P(r/r_s)} \quad (۳)$$

$$t_s^{linear}=\frac{c_1\phi p\mu r_s^2}{K\Delta P(r/r_s)} \quad (۴)$$

در ایـن رابطـه، $t_s$ زمـان عبـور سـیال از یـک محیـط تـراوا و وابسـته بـه هندسـه جریـان (خطـی یـا شـعاعی) در نظـر گرفتـه شـده اسـت. پارامترهـای $\mu$، $r_s$، $r_w$، $\Delta P$، K و P، به‌ترتیـب ویسـکوزیته، انـدازه ناحیـه تـراوا (ماسـه سـنگ در مـدل)، شـعاع چـاه، افت فشـار محیـط، تراوایی و تخلخـل اسـت. بـرای تعییـن ایـن زمـان از فـرض رابطـه دارسـی به‌عنـوان رابطـه پایـه اسـتفاده شـده اسـت (بـا فـرض برقـراری ایـن جریـان در محیـط ماسـه‌ای تـراوای مخزنـی حیـن حرکـت سـیال از چـاه تولیـدی بـه چـاه تزریقـی). بـا فـرض وجـود رابطـه دارسـی و وجـود تعـداد زیـادی بلوک‌هـای ماسـه‌ای بیـن مسـیر چـاه تولیـدی و تزریقـی در کنـار هـم مـدت زمـان لازم بـرای حرکـت، $t_s$، از رابطـه زیـر محاسـبه می‌شـود:

$$t_s=\frac{rr_s\mu\ln(\frac{r}{r_w})}{1.127*5.615*k_s(p_{Injection}-P_{Production})} \quad (۵)$$

رابطـه فـوق بـه طریـق مشـابه بـرای هندسـه جریـان خطـی مخـازن هـم می‌توانـد محاسـبه گـردد کـه نـوع دیگـری از هندسـه جریانـی اسـت [۱۷]. در رابطـه ۵ بـا جایگزینـی μ بـا مقـدار واقعـی امـکان بـدون بعدسـازی براسـاس گرانـروی وجـود دارد. گرانـروی آب در شـرایط تزریـق نزدیـک بـه ۱ cp گـزارش شـده و گرانـروی نفـت دارای بـازه بسـیار وسـیع اسـت کـه بـرای نفـت سـبک نزدیـک بـه گرانـروی آب امـا بیشـتر از آن و بـرای نفـت سـنگین تـا چنـد ده هـزار سـانتی پویـز گـزارش شـده اسـت. در ایـن تحقیـق گرانـروی آب ثابـت حـدود ۰/۸ cp فـرض شـده اسـت و گرانـروی نفـت متغیـر اسـت. بـا تغییـرات گرانـروی نفـت، نسـبت تحرک‌پذیـری فازهـای آب و نفـت (M) نیـز تغییـر می‌یابـد.

$$M=\frac{M_{water}}{M_{oil}}=\frac{Kk_{rw}/\mu_w}{Kk_{ro}/\mu_o}=\frac{k_{rw}\mu_o}{k_{ro}\mu_w} \quad (۶)$$

کـه در آن $K_{rw}$ و $K_{ro}$ تراوایـی نسـبی آب و نفـت و K تراوایـی محیـط اسـت. از آنجایی‌کـه اثـرات تراوایـی نسـبی فازهـا در ایـن مطالعـه صرف‌نظـر شـده اسـت.

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶-۳

**جدول ۲** ثوابت رابطه اصلی پرکولاسیون

| ثوابت رابطه در دو بعد [۲۴] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| متغیر | N | $\varphi_2$ | $\varphi_1$ | g | $d_t$ |
| مقدار ۲ D | ۰/۰۲±۰/۸۸ | ۴ | ۷/۳ | ۰/۱±۲/۲ | ۰/۰۰۵±۱/۱۳ |

| ثوابت رابطه برای دو بعد و سه بعد [۱۶]. | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | v | B | $\varphi_2$ | a | $\varphi_1$ | g | $d_t$ |
| مقدار ۲ D | (p<pc) ۲/۹ | | ۲/۳ | ۲ | ۲/۵ | ۱/۶ | ۰/۱±۲/۱ | ۰/۱±۱/۴۵ |
| مقدار ۳ D | (p<pc), ۱/۶<br>(p>pc) ۲/۶ | ۱/۳۳ | ۵ | ۳ | ۱/۱ | ۳ | ۰/۱±۲ | ۰/۰۵±۱/۳۳ |

لـذا نسـبت تحرک‌پذیـری عمدتـاً بیانگـر نسـبت ویسـکوزیته دوفـاز و بـا M نشـان داده مـی شـود. طـی مطالعـات انجـام شـده و نتایـج شبیه‌سـازی مشـخص شـد کـه رابطـه تخمیـن بـرون‌زد براسـاس جریـان خطـی رابطـه ۴ بـرای مدل‌هایـی بـا اشغال‌شـدگی (p) پاییـن دقـت مناسـبی دارد و رابطـه تخمیـن بـرون‌زد براسـاس جریـان هندسـی رابطـه ۳ بـرای مدل‌هایـی بـا اشغال‌شـدگی (p) بـالا دقـت مناسـبی دارد [۱۹]. لـذا رابطـه پیشـنهادی شـکراله زاده بـرای تخمیـن زمان‌بـرون‌زد به‌صـورت زیـر اسـت:

$$t_s = x t_s^{radial} + (1-x) t_s^{linear} \quad (۷)$$

در ایـن رابطـه، متغیـر x یـک ضریـب وزنـی بیـن صفـر و یـک اسـت. مقـدار دقیـق متغیـر x در ایـن بررسـی بـرای هـر حالـت (مقادیـر p مختلـف) بـا اسـتفاده از بهینه‌یابـی تعییـن گردیـد.

## نتایج و بحث و بررسی

### تهیه مدل استاتیک

در مرحلـه اول پیاده‌سـازی رویکـرد تراوشـی لازم اسـت ده‌هـا مـدل تصادفـی اسـتاتیک مخـزن بـا سـاختار تراوشـی تهیـه شـوند. لـذا در ابتـدا بانـک داده‌ای از مدل‌هـای اسـتاتیک تراوشـی تهیـه شـد. کلیـه اطلاعـات مربـوط بـه ایـن مدل‌هـا در جـدول ۳ ارائـه شـده اسـت. ضخامـت خالـص بـه ناخالـص[۱] بـرای کل مخـزن برابـر ۱ در نظـر گرفتـه شـد و بخش‌هـای مخزنـی و غیـر مخزنـی بـا تفـاوت در تخلخـل و تراوایـی از هـم تفکیـک شـدند.

ایـن مدل‌هـا دوبعـدی و متشـکل از ۲۰۰×۲۰۰×۱ گریـد بـا انـدازه ۱۰ $m^3$ هسـتند. سـری‌های مختلـف مدل‌هـای تراوشـی بـا متغیرهـای متنـوع تهیـه شـد. بـا توجـه بـه نیـاز بـه تهیـه هـزاران مـدل، ایـن مرحلـه بـه اسـتفاده از کدنویسـی در محیـط نرم‌افـزار پتـرل[۲] بـا اسـتفاده از بخـش جریـان کارهـا[۳] نـرم افـزار، به‌صـورت خـودکار اجـرا گردیـد. ایـن مدل‌سـازی بـا اجـرای دو حلقـه مسـتقل شبیه‌سـازی به‌دسـت آمـد. مدل‌هـا بـا سـه فـرض (الـف) مدل‌هـای تصادفـی بـا توزیـع نرمـال، (ب) امـکان برقـراری ارتبـاط بیـن چـاه تزریقـی و تولیـدی و (ج) بـرای مقبولیـت جامعـه آمـاری تعـداد ۱۵۰ مـدل بـرای حالـت پایـه تهیـه شـد. شـکل ۲ تعـدادی از مدل‌هـای تخلخـل و تراوایـی مربـوط بـه دو حالـت p=%۵۰ و p=%۷۰ را در کنـار نمـودار اشغال‌شـدگی نمایـش می‌دهـد.

در مرحلـه شبیه‌سـازی جریـان، یـک حالـت تولیـد-تزریـق مشـخص تعریـف گردیـد. در ایـن حالـت، یـک حلقـه چـاه تولیـدی و تزریقـی فـرض گردیـد. چـاه تولیـدی در سـلول (۵۰، ۵۰) و چـاه تزریقـی (۱۵۰، ۱۵۰) بـا نـرخ تولیـد تزریـق ۵۰ بشـکه در روز جهـت حفـظ voidage ratio برابـر ۱ در نظـر گرفتـه شـد. ایـن حالـت بـرای کلیـه مدل‌هـای اسـتاتیک یکسـان فـرض شـده اسـت. کلیـه اطلاعـات مربـوط بـه خصوصیـات دینامیـک در جـدول ۴ ارائـه شـده اسـت.

1. Net To Gross (NTG)
2. Petrel
3. Workflows

**جدول ۳** مقادیر استفاده شده در مدل‌های تراوشی در حالت پایه (استاتیک)

| | متغیر | مقدار | واحد | رابطه جهت محاسبه |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | K | ۵۰۰۰ و ۰ به‌ترتیب در بخش تراوا و غیر تراوا | D | $k = \frac{1e4\phi^3}{(1-\phi)^2}$ |
| ۲ | φ | ۰/۲۵ و ۰ به‌ترتیب در بخش تراوا و غیر تراوا | % | تخصیص مقدار |
| ۳ | NTG | ۱ | بدون‌بعد | تخصیص مقدار |
| ۴ | گریدبندی | ۲۰۰×۲۰۰×۱ گرید به ابعاد ۱۰^۳ | $m^3$ | تعریف مدل استاتیک |
| ۵ | نمودار $k_r$ | نمودار خطی تراوایی نسبی آب و نفت بدون اشباع باقی‌مانده | | |
| ۶ | حالت | یک چاه تولیدی در سلول (۵۰, ۵۰) و یک حلقه چاه تزریقی (۱۵۰, ۱۵۰) با نرخ تولید تزریق ۵۰ بشکه در روز جهت حفظ نسبت تخلیه[1] برابر ۱ | | |

| P | نمایش تراوایی | نمایش تخلخل | نمایش اشغال‌شدگی |
|---|---|---|---|
| %۵۰ | میانگن تراوایی= ٦٢mD | میانگن تخلخل= ١٠% | تعداد کلاستر= ٣٤ |
| %۷۰ | میانگن تراوایی= ٧٨ mD | میانگین تخلخل= ١٤% | تعداد کلاستر= ١٥ |

**شکل ۲** وضعیت تراوایی و تخلخل در تعدادی از مدل‌های استاتیک

1. Voidage Ratio

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶-۳

**جدول ۴** مقادیر استفاده شده دینامیک در مدل‌های تراوشی

| | متغیر | مقدار | واحد | رابطه جهت محاسبه |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | $P_i$ | ۴۰۰۰ | psi | تخصیص مقدار |
| ۲ | $T_i$ | ۱۷۰ | F° | تخصیص مقدار |
| ۳ | اشباع اولیه | $S_{oil}= 100, S_{gas}= 0 ,S_{water}= 0$ | % | تخصیص مقدار |
| ۴ | $R_s$ | ۲۱۰ | scf/stb | رابطه Lasater (1958) |
| ۵ | شوری آب | ۲۰۰۰۰۰ | ppm | رابطه McCain (1990) |
| ۶ | $B_o$ | ۱/۱۳ | bbl/stb | |
| ۷ | $P_b$ | ۱۱۲۰ | psi | تخصیص مقدار |
| ۸ | $\mu_o$ | ۱/۴۳ —۰/۸ | cp | |
| ۹ | $P_c$ | ۰ | psi | تخصیص مقدار |

در ادامه، شبیه‌سازی عددی برروی کلیه مدل‌های استاتیک اجرا شد. این کار با قابلیت‌های موجود نرم افزار پیاده‌سازی شد. این کد برای یک مدل استاتیک مشخص، با تخلخل و تراوایی تعیین شده، نمودارهای تراوایی نسبی و خصوصیات سیال مشخص، شرایط اولیه یکسان و حالت تولید و تزریق از پیش تعیین شده، یک حالت شبیه‌سازی یا "Case" جدید تعریف می‌کند. سپس با فراخوانی نرم‌افزار Eclipse-E100، روابط جریان در محیط نرم‌افزار مذکور به‌صورت Black oil حل می‌کند. پس از پایان شبیه‌سازی برروی یک حالت، صفحه اجرای اکلیپس بسته شده و مراحل ساختن حالت تولیدی جدید و شبیه‌سازی برروی مدل استاتیک بعدی به‌صورت خودکار شروع می‌شود.

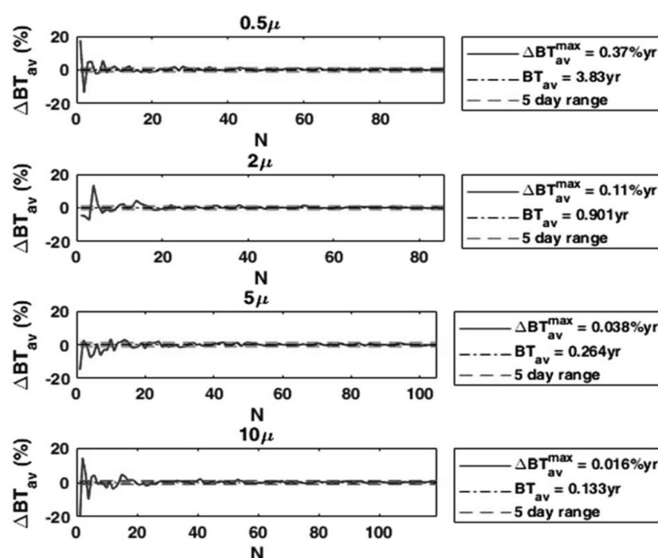
**اجرای مدل دینامیک و محاسبه زمان‌برون‌زد**

برای تعیین تعداد کافی مدل استاتیک، تغییرات میانگین زمان‌برون‌زد بررسی شد. با درنظر گرفتن شرط‌های سه‌گانه ۳۰۰ مدل برای یک مقدار اشغال‌شدگی مشخص (p=۰/۶) مشخص شبیه‌سازی شده و میانگین زمان‌برون‌زد این ۳۰۰ مدل برابر ۵۰۰ روز است، لذا ۲/۵ روز به‌عنوان معیار سنجش کفایت تعداد مدل‌ها انتخاب شد. نتایج تغییرات نسبت گرانروی در این حد اشغال‌شدگی در جدول ۵ ارائه شده است.

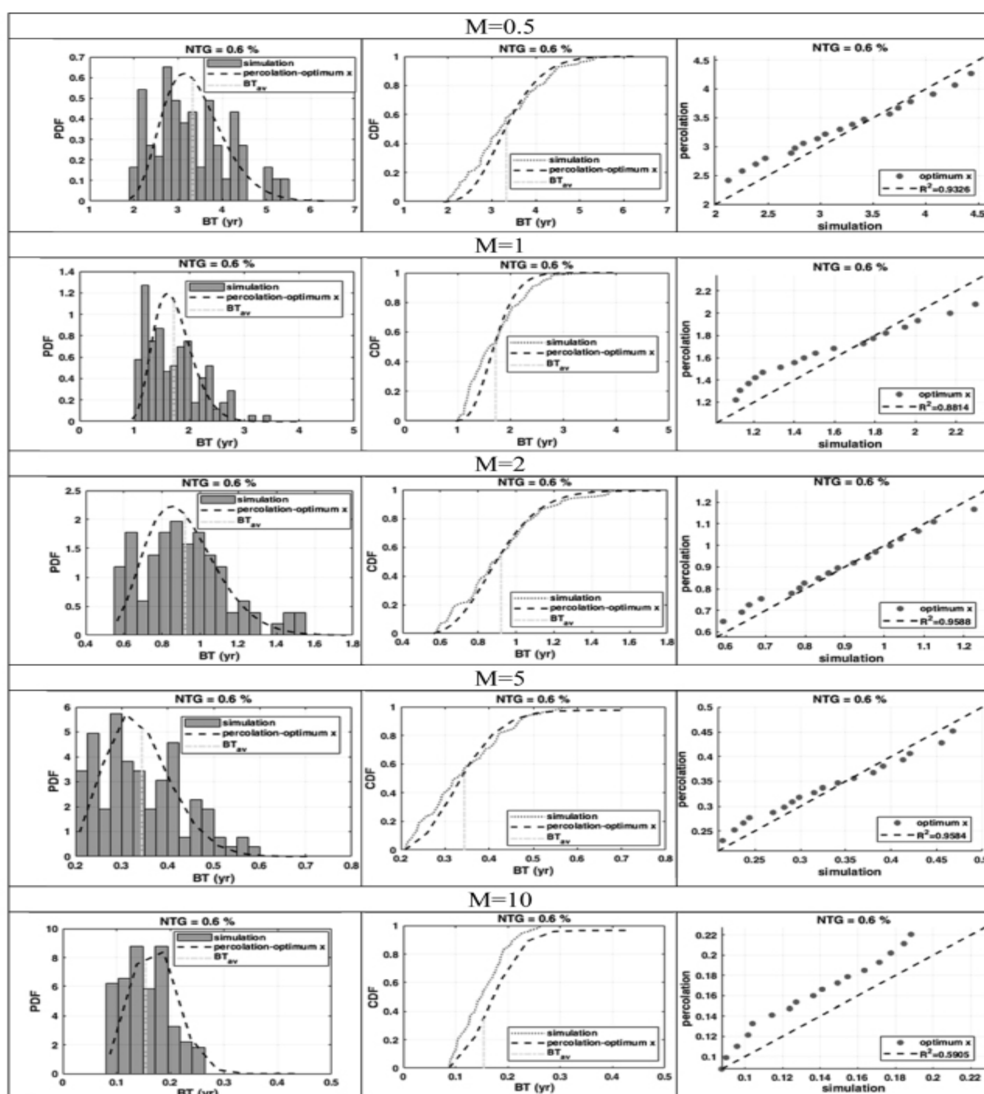
**جدول ۵** مقادیر به‌دست آمده در شبیه‌سازی مدل با نسبت‌های تحرک‌پذیری متفاوت بخش غیرمخزنی

| P | شرح مدل | زمان‌برون‌زد میانگین (سال) | تعداد مدل‌های شبیه‌سازی شده |
|---|---|---|---|
| ۰/۶ | M= ۰/۵ | ۳/۳۸ | ۹۷ |
| | M= ۱ | ۲/۱۶ | ۱۳۳ |
| | M= ۲ | ۰/۹۰۱ | ۸۶ |
| | M= ۵ | ۰/۲۶۴ | ۱۰۵ |
| | M= ۱۰ | ۰/۰۱۶ | ۱۱۹ |

شکل ۳ تغییرات در میانگین زمان برون‌زد را در حالت‌های M=۰/۵ تا M =۱۰ نمایش میدهد. نمایش بازه ۵ روزه در این نمودارها تنها برای مقایسه است. در واقع این بخش از ۰/۰۵٪ زمان میانگین برون‌زد کل مجموعه شبیه‌سازی استفاده شده است. در صورت استفاده از بازه بزرگتر (برای مثال ۵ روز) امکان عدم شناسایی دقیق زمان‌برون‌زد وجود دارد. در شکل ۴، سه سری نمودار برای هر کدام از Mها رسم شده است. نمودار اول از سمت چپ هیستوگرام زمان‌برون‌زد است. نمودار وسط توزیع تجمعی احتمال زمان‌برون‌زد (CDF) و نمودار سمت راست نمودار چندک-چندک متناظر را نشان می‌دهد.




**شکل ۳** تغییرات در میانگین زمان‌برون‌زد به منظور تعیین تعداد مدل‌های کافی با تغییر نسبت گرانروی برای p= ۰/۶




**شـــکل ۴** مقایســه زمان‌بـرون‌زد در مـدل بـا درجـه اشغال‌شـدگی p=۰/۶. بـا نتایـج شبیه‌سـازی و رابطـه پرکولاسـیون بـرای زمانی‌کـه نسـبت گرانروی M=۰/۵، M= ۱، M= ۲، M= ۵ و M= ۱۰ اسـت

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶-۳

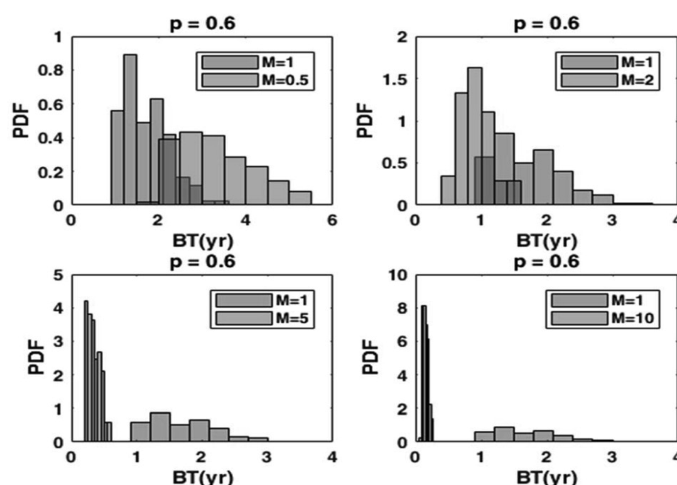
در هرکدام، نمودار زمان‌برون‌زد حاصل از شبیه‌سازی عددی در کنار پیش‌بینی به‌دست آمده از رابطه پرکولاسیون رابطه ۲ رسم شده است. در رسم این نمودارها برای بدون‌بعدسازی از رابطه بهینه رابطه ۷ استفاده شده است. گرانروی سیال در قالب M، یکی از متغیرهای رابطه ۵ است. لذا، نسبت گرانروی استفاده شده در شبیه‌سازی عددی به این طریق در محاسبات رابطه پرکولاسیون مؤثر بوده است. در واقع اینجا به منظور بدون بعدسازی متغیرهای رابطه ۲، نسبت M وارد روابط شده است. در این بخش تنها با قرار دادن مقدار گرانروی جدید در رابطه ۵ و استفاده از آن با رابطه ۷ برای بدون بعدسازی رابطه ۲، نمودار پرکولاسیون به‌دست آمده است. مقایسه سطح خطای این دو رویکرد در جدول ۶ خلاصه شده است. نمودارهای نشان داده شده در شکل ۴ و بررسی مقادیر خطا در جدول ۶ تطابق مناسب رابطه پرکولاسیون به‌دست آمده براساس بدون بعدسازی مناسب را نشان می‌دهد. علاوه بر مقایسه رابطه پرکولاسیون با نتایج شبیه‌سازی عددی، موضوع دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفت. این موضوع تغییرات در زمان‌برونزد برای حالات مختلف M بود. به این منظور هیستوگرام مربوط به زمان‌برونزد برای مقادیر متفاوت M در شکل ۵ رسم شده است. در هر کدام از منحنی‌های این شکل، هیستوگرام حالت ۱ ≠M در کنار هیستوگرام حالت ۱ =M رسم شده است. این منحنی نشان می‌دهد:

۱- هیستوگرام زمان‌برون‌زد برای مدل‌های نزدیک به آستانه پرکولاسیون (حالت ۰/۶ =p) و با گرانروی‌های مختلف، با افزایش گرانروی نفت، میانگین زمان‌برون‌زد کاهش می‌یابد.

۲- نمودار توزیع احتمالی با افزایش M باریک‌تر و بلندتر شده است که نشان می‌دهد.

**جدول ۶** خطای پیش‌بینی از رویکرد پرکولاسیون در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف M

| P | شرح مدل | مقدار x | خطای پیش‌بینی نمودارهای Quantile-Quantile |
|---|---|---|---|
| ۰/۶ | M= ۰/۵ | ۰ | ۰/۹۳۲۶ |
| | M= ۱ | ۰ | ۰/۸۸۱۴ |
| | M= ۲ | ۰ | ۰/۹۵۸۸ |
| | M= ۵ | ۰ | ۰/۹۵۸۴ |
| | M= ۱۰ | ۰ | ۰/۵۹۰۵ |




**شکل ۵** مقایسه توزیع زمان‌برون‌زد حاصل از شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف M در مقایسه با حالت ۱=M برای شرایط نزدیک به آستانه تراوش ۰/۶ =p

با افزایش نسبت گرانروی ساختار جریانی به مدل همگن نزدیک شده است.

۳- با کاهش گرانروی ساختار جریانی به مدل تصادفی نزدیکتر می‌شود. بر این اساس و با توجه به اینکه استفاده از روش پرکولاسیون برای مدل همگن روشی مناسب نیست می‌توان توجیه نمود که خطای پیش‌بینی، زمانی‌که M= ۱۰ است خطای بالایی ($R^2$~۰/۶) دارد. در بقیه حالات روش پرکولاسیون پیش‌بینی مناسبی داشته است.

نتایج فوق برای مدل‌های با درجه اشغال‌شدگی بالاتر از آستانه پرکولاسیون (نزدیک به مدل‌های همگن با مقدار p= ۰/۸) نیز تکرار شد. این نتایج نشان داد یافته‌های مربوط به قبل از حد آستانه برای مقادیر بالای p نیز قابل قبول هستند. یعنی:

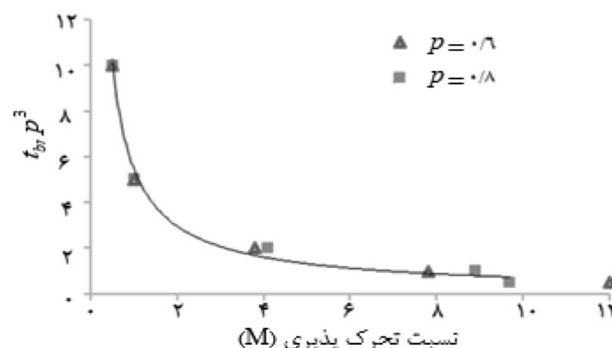
۱- با افزایش گرانروی نفت، میانگین زمان‌برون‌زد کاهش می‌یابد.

۲- نمودار توزیع احتمالی با افزایش M باریک‌تر و بلندتر شده است. این موضوع برای p بالاتر از حد آستانه شدیدتر است. با افزایش نسبت گرانروی ساختار جریانی به مدل همگن نزدیک شده است. با کاهش گرانروی ساختار جریانی به مدل تصادفی نزدیک‌تر می‌شود.

مقادیر خطای پیش‌بینی زمان‌برونزد نسبتاً بالایی در حالت نسبت تحرک‌پذیری بالا (M= ۱۰) از جدول ۶ دیده می‌شود ($R^2$~۰/۶) که می‌تواند با اثرات انگشتی شده (fingering) رفتار محیط تراوش را تحت تاثیر قرار داده و به رفتار سیستم‌های همگن نزدیک شود. در بقیه حالات روش پرکولاسیون پیش‌بینی مناسبی داشته است. مشابه همین شبیه‌سازی برای حالت اشغال‌شدگی برابر با ۰/۸ انجام شد. که به منظور جلوگیری از طولانی شدن متن از ذکر جزئیات خودداری می‌شود. با رسم نمودارهای لگاریتمی زمان‌برون‌زد بدون بعد برحسب نسبت گرانروی، امکان برازش خط با تقریب مناسب وجود دارد. اما این خط همتا نبوده و برای p= ۰/۶ و ۰/۸ p= متفاوت است. از آنجا که ارتباط زمان‌برون‌زد میانگین با توان سوم p مشخص می‌کند، در اینجا با استفاده از این تقریب نمودارهای مربوطه رسم شد. به این ترتیب، اول زمان‌برون‌زد بدست آمده از شبیه‌سازی با تقسیم بر مقدار $t_s$ مربوطه نرمالایز شد و در نهایت در $p^3$ ضرب و براساس M رسم گردید. براساس شکل ۶ می‌توان نتیجه‌گیری نمود زمان مشخصه مناسب در رابطه مقیاس‌بندی زمان‌برون‌زد علاوه‌بر وابستگی به درجه اشغال شدگی به نسبت گرانروی دو سیال تزریقی و تولیدی M هم وابسته است. رابطه توصیف‌کننده این وابستگی براساس نتایج حاصل شده در نسبت های گرانروی مختلف از شکل ۶ رابطه توانی و با توان ۱/۳ را نشان می‌دهد.

$$t_{br} = f\,(t_s, p^{-3}, M) \qquad (۸)$$

از رابطه فوق می‌توان برای پیش‌بینی میانگین زمان‌برون‌زد برای مدل‌هایی با مقادیر غیر از مقادیر گزارش شده در این مطالعه استفاده نمود.




**شکل ۶** تغییرات در میانگین زمان‌برون‌زد با تغییرات در نسبت تحرک‌پذیری سیالات

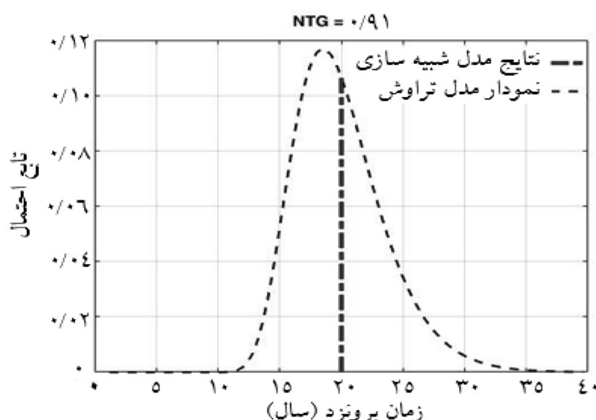
پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶-۳

**مطالعه موردی در یک مخزن واقعی**

در ادامه این مطالعه و به‌منظور اعتبارسنجی نتایج رویکرد پیشنهادی در پیش‌بینی زمان‌برونزد یک مخزن واقعی انتخاب و برش‌های دوبعدی از آن در جهت‌های مختلف تهیه گردید. روش تبدیل نقشه مخزنی به مدل تراوش با در نظر گرفتن یک مقدار مناسب آستانه بر داده‌های تراوایی مخزن (به‌طوری‌که اتصال بین چاه‌ها فراهم باشد) در نظر گرفته شد. بدین ترتیب گریدهای با مقدار تراوایی کم‌تر از مقدار آستانه غیرمخزنی (تراوایی صفر) و گریدهای با تراوایی بیشتر گرید مخزنی محسوب شده و لذا مدل مخزن به ساختار تراوشی تبدیل گردید. از بین چاه‌های موجود، دو چاه به‌عنوان چاه‌های تزریقی و تولیدی در نظر گرفته و فعال شد. سایر اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی مخزن مانند افت فشار بین دوچاه و ابعاد ناحیه شبیه‌سازی شده و فاصله بین دو چاه در جدول ۷ خلاصه شده است. سپس با اجرای شبیه سازی با نرم‌افزار جریان زمان‌برونزد محاسبه شد و با مقدار پیش‌بینی شده رابطه تعمیم داده شده زمان‌برونزد بر پایه پرکولاسیون (روابط ۲ و ۸) مقایسه گردید. زمان‌برونزد در مخزن حدود ۲۰ سال است و در بازه قابل قبول پیش‌بینی روش پرکولاسیون براساس شکل ۷ قرار می‌گیرد.

**جدول ۷** اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی مخزن

| φ | pΔ | $K_s$ | $r_s$ | $p_c$ | r | p | L | $t_{br}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % | psi | md | m | - | m | - | m | day |
| ۷ | ۲۶۰۰ | ۱۰۰ | ۴۴۳ | ۰/۶۳۳ | ۶۳۵۲ | ۰/۹۱ | ۱۱۵۲۵ | ۷۳۰۵ |




**شکل ۷** مقایسه زمان‌برونزد در مخزن واقعی با نمودار توزیع زمان‌برونزد براساس روابط ۸ و ۲

**نتیجه‌گیری**

در این مطالعه از رویکرد پرکولاسیون برای پیش‌بینی زمان‌برون‌زد سیال تزریقی به مخازن نفتی استفاده شد. به‌طور خاص با تعمیم رابطه کلی برای تخمین زمان‌برون‌زد بر پایه پرکولاسیون با استفاده از رویکرد بی‌بعد سازی بر مبنای زمان مشخصه بی‌بعد با استفاده از رابطه دارسی با هدف در نظر گرفتن اثر نسبت گرانروی فازها استفاده شد. در این کار برای ۳۰۰ مدل مختلف مخزن به‌عنوان مدل‌های تراوشی با سیالات با گرانروی مختلف شبیه‌سازی جریان انجام شد. در رابطه اولیه زمان‌برون‌زد بر پایه پرکولاسیون فرض برابر بودن گرانروی سیال درجا و سیال تزریقی وجود داشت که به‌عنوان مدل پایه در این مطالعه در نظر گرفته شد. به منظور بررسی اثر نسبت گرانروی دو فاز، تعدادی از شبیه‌سازی‌ها با تغییر این نسبت

به مقدار بیشتر و کمتر از یک انجام گرفت و زمان‌برونزد در آنها محاسبه گردید. در ادامه نمودارهای هیستوگرام به‌دست آمده از شبیه‌سازی با رابطه پرکولاسیون مقایسه گردید و رابطه تعمیم داده شده برای پیش‌بینی زمان‌برون‌زد برای مخازنی با نسبت گرانروی ۰/۵تا ۱۰ بررسی شد. نتایج نشان داد زمان مشخصه مناسب در رابطه مقیاس‌بندی زمان‌برونزد وابسته به نسبت گرانروی دو فاز به فرم یک رابطه توانی با توان ۱/۳ دارد. لذا با در نظر گرفتن این وابستگی توانی برای نسبت گرانروی دوفاز و با شبیه‌سازی یک مخزن واقعی و مقایسه نتایج زمان‌برونزد در آن کارآیی تابع توزیع زمان‌برونزد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد زمینه به‌کارگیری رابطه را برای مخازن واقعی میسر نموده است

## مراجع

[1]. Sahimi M (1994) Applications of Percolation Theory, CRC Press.
[2]. King P, Masihi M (2018) Percolation theory in reservoir engineering, Published by World Scientific, 300, 978-1-78634-523-3.
[3]. Flory P J (1941) Molecular size distribution in three dimensinal polymerrs, Journal of the American Chemical Society, 63, 11: 3083-3090.
[4]. Broadbent S R, Hammersley J M (1957) Percolation processess, Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 629-641.
[5]. Selyakov V I, Kadet V V (1996) Percolation models for transport in porous media with applications to reservoir engineering, Springer.
[6] King P R, Buldyrev S V, Dokholyan N V, Havlin S, Lopez E, Paul G, Stanley H E (2002) Using percolation theory to predict oil field performance, Physica, A314: 103-108.
[7]. Chandler R, Koplik J, Lerman K, Willemsen J F (1982) Capillary displacement and percolation in porous media, Journal of Fluid Mechanics, 119: 249-267.
[8]. Lenormand R, Bories S (1980) Description d›un mécanisme de connexion de liaison destiné à l›étudedu drainageavec piégeage en milieu poreux, Comptes Rendus Hebdomadaires Des Séances De ‹L›Académie Des Sciences, 279-291.
[9]. Wilkinson D, Willemsen J F (1983). Invasion percolation: a new form of percolation theory, Journal of Physics A: Mathematical and General, 16: 3365-3376.
[10]. Chayes J T, Chayes L, Newman C M (1985) The stochastic geometry of invasion percolation, Communications in Mathematical Physics, 101: 383-407.
[11]. Bak P, Tang C, Wiesenfeld K (1987) Self-Organized Criticality: an explanation of 1/f noise, Physical Review Letters, 59, 4: 381-384.
[12]. Dickman R, Munoz M A, Vespignani A, Zapperi S (2000), Paths to self-organized Criticality, Brazilian Journal of Physics, 30, 1: 27-39.
[13]. Dhar D (2017) Self-tuning to the critical point: invasion percolation, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical.
[14]. Masihi M, R Shams, PR King (2022) Pore level characterization of Micro-CT images using percolation theory, Journal of Petroleum Science and Engineering, 110113.
[15]. Rui G, Xin W, Mingguang C, Bo C, Chunming H (2017) The fractures optimization method with the threshold pressure of multistage fracturing in tight oil reservoir, In SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition. OnePetro.
[16]. Andrade J S, Buldyrev S V, Dokholyan N V, Havlin S, King P R, Lee Y, Paul G, Stanley H E (2000) Flow between two sites on a percolation cluster, Physical Review, E 62, 6: 1-31.
[17]. King P R, Buldyrev S V, Dokholyan N V, Havlin S, Lopez E, Paul G, Stanley H E (2002) Percolation Theory, London Petrophysical Society.
[18] Ganjeh-Ghazvini M, Masihi M, Ghaedi M (2014) Random walk-percolation based modeling of two phase flow in porous media: breakthrough time and net to gross ratio estimation, Physica A, 406: 214-221.
[19]. Shokrollahzadeh S, Masihi M, M Ghazanfari H, King P (2019) Effect of characteristic time on scaling of breakthrough time distribution for two-phase displacement in percolation porous media, Transport in Porous Media, 130, 3: 889-902.
[20]. Sadeghnejad S, Masihi M, Pishvaei M, Shojaei A, King P R (2014) Estimating connected volume of hy-

drocarbon during early reservoir life by percolation theory, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 36, 3: 301-308.
[21]. Sadeghnejad S, Masihi M (2016) Point to point continuum percolation in two dimensions, Journal of Statistical Mechanics, Theory and Experiment, 10: 103210.
[22]. Sadeghnejad S, Masihi M (2017) Analysis of a more realistic well representation during secondary recovery in 3-D continuum models, Computational Geosciences, 21, 5-6: 1035-1048.
[23]. Sadeghnejad S, Masihi M (2011) Water flooding performance evaluation using percolation theory, Iranian Journal of Petroleum Science and Technology, 2: 19-23.
[24]. Dokholyan N V, Lee Y, Buldyrev S V, Havlin S, King P R, Stanley H E (1999) Scaling of the distribution of shortest paths in percolation, Journal of Statistical Physics, 93, 3: 603-613.

# بررسی اثر جریان مارانگونی و چینش مولکولی در پایداری فوم ایجاد شده توسط نانوذرات- مطالعه آزمایشگاهی

فاطمه رئیسی[۱]، مریم خسروی*[۲]، بهزاد رستمی[۱]، حمید وطن پرست[۲] و علیرضا فتح اللهی[۱]

۱- انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، ایران

۲- پژوهشکده مهندسی نفت، پردیس توسعه صنایع بالادستی نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱

**چکیده**

استفاده از نانو ذرات به‌همراه سورفکتانت برای تولید و پایدار کردن فوم می‌تواند باعث رفع محدودیت‌های استفاده از سورفکتانت شود و پایداری فوم را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی و پیدا کردن نحوه چینش نانوذرات و مولکول‌های سورفکتانت در سطح تماس و تأثیر جریان مارانگونی در پایداری فوم در حضور نانوذرات است. در این مطالعه، آزمایشات برای دو سیستم فوم مختلف: (۱) نانوذرات آنیونی-سورفکتانت کاتیونی (CTAB) و (۲) نانوذرات آنیونی-سورفکتانت آنیونی (SDS) انجام شدند. برای تعیین چینش مولکول‌های سورفکتانت و نانوذرات در سطح تماس و فیلم مایع و تعیین اثر مارانگونی نتایج این آزمایش‌ها با آزمایش‌های پایه متناظر در غیاب نانوذرات مقایسه شدند. مشاهدات نشان می‌دهند اگرچه حضور نانوذرات باعث افزایش پایداری فوم در هر دو سیستم می‌شود، اما مکانیسم‌های موثر در پایداری سیستم‌ها متفاوت هستند. براساس مشاهدات، حضور نانوذرات در سیستم فوم SDS (همبار) باعث افزایش فوم‌زایی و پایداری فوم می‌شود، اما در سیستم فوم CTAB (ناهمبار) علی‌رغم کاهش فوم‌زایی، پایداری فوم افزایش می‌یابد. بنابر مشاهدات ذکر شده در سیستم همبار مؤثرترین عامل در پایداری فوم، نیروهای دافعه هستند که مولکول‌های سورفکتانت بیشتری را به‌سطح تماس ارسال می‌کنند. تحلیل نتایج کشش سطحی نشان داد در این سیستم جریان مارانگونی با اثر منفی تخلیه مایع در اثر گرانش مقابله می‌کند و باعث پایداری فوم می‌شود. از سوی دیگر در سیستم ناهمبار حضور نانوذرات در سطح تماس با کاهش نفوذمولکولی و افزایش انرژی جدا کردن ذرات باعث افزایش پایداری فوم می‌شود. حضور نانوذرات در سطح تماس آن را به یک سطح جامد مانند تبدیل می‌کند و به‌علت الاستیسته بالای سطح جریان مارانگونی اتفاق نمی‌افتد.

**کلمات کلیدی: نانوذرات، پایداری فوم، فوم‌زایی، اثر مارانگونی، چینش مولکولی**

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی khosravim@ripi.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4686.3105)

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۲۶-۱۷

**مقدمه**

تزریق گاز یکی از رایج‌ترین و مرسوم‌ترین تکنیک‌های ازدیادبرداشت نفت است، اما به‌دلیل تحرک بالای فاز گاز (و در نتیجه، پدیده‌ی انگشتی شدن، کانال‌زنی و بالاروی ثقلی[1]) بازده نسبتاً پایینی دارد. تزریق فوم راه حل پیشنهادی برای بهبود تحرک‌پذیری گاز است. فوم از طریق کاهش تراوایی نسبی گاز به‌وسیله به دام انداختن گاز و نیز افزایش گرانروی مؤثر گاز، سبب کاهش تحرک‌پذیری گاز و کاهش جدایش ثقلی می‌شود اما، این روش با چالش پایداری مواجه است. به همین منظور، مطالعات گسترده‌ای برای افزایش پایداری فوم و عوامل مؤثر بر آن شامل اثر گرانش، اثر مارانگونی، نفوذ مولکولی، فشار جدایش، فشار مویینگی و اثر نفت انجام شده است. در چند دهه اخیر یکی از راه‌های پیشنهادی برای افزایش پایداری فوم استفاده از نانوذرات برای افزایش پایداری است. تمرکز اصلی این مطالعه بررسی اثر مارانگونی در حضور نانوذرات، و قرارگیری مولکول‌های سورفکتانت و نانوذرات در سطح تماس، در پایداری فوم است [۱-۸]. اثر مارانگونی برای اولین بار توسط وبر برای پدیده اشک شراب مورد بررسی قرار گرفت. او ادعا کرد این پدیده به‌علت گرادیان تنش میان رویه اتفاق می‌افتد. در اصل، جریان همرفتی سیالات از نقطه‌ای با کشش سطحی کم تا نقطه‌ای با کشش سطحی بالا را جریان مارانگونی می‌نامند. مطالعات نشان داده‌اند در سیستم فوم، هنگام تخلیه مایع از یک فیلم به‌علت حرکت فیلم مایع به‌سمت مرز مسطح و اختلاف فشار موئینگی، فیلم در یک منطقه نازک می‌شود و باعث افزایش سطح حباب می‌شود. بنابراین در قسمت وسط فیلم نسبت به مرز مسطح غلظت سورفکتانت کمتر است، درنتیجه یک جریان از مرز مسطح به‌سمت وسط فیلم (عکس جریان در تخلیه فیلم مایع) در سطح مایع اتفاق می‌افتد که سرعت تخلیه را پایین می‌آورد [۱۰ و ۹].

تأثیر دیگر مارانگونی هنگامی است که حباب به‌دلایل مختلف کشیده می‌شود و یک افزایش سطح اتفاق می‌افتد. بنابراین، غلظت سورفکتانت در برخی قسمت‌های حباب کم می‌شود، پس مارانگونی باعث حرکت سورفکتانت روی سطح حباب و برگرداندن حباب به شکل اولیه‌اش و درنتیجه پایداری فوم می‌شود. مطالعات بررسی اثر مارانگونی در فوم نشان داده است اگرچه جریان مارانگونی باعث کاهش تخلیه فیلم مایع می‌شود اما میزان تأثیر آن وابسته به گرادیان کشش سطحی و ویسکوزیته سطحی حباب متفاوت است و در گرادیان کشش سطحی بالاتر و ویسکوزیته سطحی کمتر جریان مارانگونی تأثیر به سزاتری در پایداری فوم ایفا می‌کند [۱۱ و ۱۰]. تحقیقات نشان داده است که یکی از مؤثرترین راه‌ها برای تثبیت کف استفاده از نانوذرات است. موهانتی یک مطالعه تجربی جهت بررسی فوم پایدار شده توسط سورفکتانت-نانوذرات انجام داد. نتایج آزمایشات نشان داد که در حضور نانوذرات، نیمه عمر فوم و ضریب بازیافت نفت به طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد و همچنین در سیستم‌هایی که نانوذرات به‌سطح تماس گاز و مایع جذب می شوند، مقدار قابل توجهی انرژی برای حذف ذرات از سطح مورد نیاز است و این انرژی، انرژی جداسازی[2] نامیده می‌شود. همچنین مطالعات نشان داده است در برخی سیستم‌های فوم حضورنانوذرات در سطح تماس به‌علت تغییر خواص سطحی باعث افزایش چشم‌گیر پایداری فوم می‌شود و در برخی از سیستم‌ها برخلاف عدم حضور نانوذرات در سطح تماس، پایداری فوم افزایش می‌یابد [۱۲-۱۷]. همان‌طور که گفته شد، مطالعات متعددی برای تعیین تأثیر نانوذرات بر پایداری فوم انجام شده‌است. با این حال، مطالعات کمی رفتار فوم را در سیستم‌های همبار و ناهمبار به‌طور همزمان بررسی کرده‌اند.

1. Gravity Override
2. Detachment Energy

بنابراین، این مطالعه با دیدگاهی جدید طراحی شده‌است تا با بررسی فومزایی، پایداری فوم و کشش سطحی در حضور و عدم حضور نانوذرات بینشی از آرایش نانوذرات در لاملا ارائه دهد. لازم به ذکر است به‌علت جای خالی بررسی اثر مارانگونی بر پایداری فوم حاوی نانوذرات در مطالعات انجام شده، در این مقاله با مشاهده تغییر کشش سطحی با غلظت نانوذرات تأثیر جریان مارانگونی بر پایداری فوم در حضورنانوذرات مشخص می‌گردد.

## طراحی آزمایشات

به‌منظور بررسی چینش نانوذرات و مولکول‌های سورفکتانت در فیلم مایع و سطح تماس، آزمایشات استاتیک (به‌منظور اندازه‌گیری فومزایی و پایداری فوم) و کشش سطحی در حضور و عدم حضور نانوذرات انجام شدند و به‌منظور بررسی اثر مارانگونی گرادیان آزمایش‌های کشش سطحی در حضور نانوذرات مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایشات راس میلز (آزمایش استاتیک) و اندازه‌گیری کشش سطحی برای چهار سری ذکر شده در جدول ۱ انجام شد. در این جدول حضور دو نوع سورفکتانت آنیونی و کاتیونی مورد استفاده و نانوذرات در هر سری آزمایش مشخص می‌شود. علامت تیک به‌منزله حضور ماده مورد نظر در آن سری از آزمایشات است.

### مواد استفاده شده

از دو نوع سورفکتانت به‌عنوان عامل ایجادکننده فوم استفاده شده‌است. هگزا دسیل تری متیل آمونیم برمید (CTAB) با درجه خلوص بیش از ۹۷/۷٪ و سدیم دودسیل سولفات (SDS خلوص >۹۹/۶۹۶) به‌ترتیب به‌عنوان سورفکتانت کاتیونی و آنیونی استفاده شدند. نانوذرات آب دوست سیلیکا ($SiO_2$) به قطر میانگین ۱۲ تا ۱۴ nm که از شرکت نانو صدرا تهیه شدند به‌عنوان پایدارکننده فوم به‌کار رفتند. از آب مقطر جهت پراکنده ساختن سورفکتانت و نانوذرات استفاده شد.

### آماده‌سازی محلول

به‌منظور به حداقل رساندن خطا، ۱۰۰ g محلول حاوی ۵ CMC سورفکتانت تهیه شده، سپس به غلظت‌های مورد نظر رقیق شد و همچنین به‌منظور جلوگیری از تشکیل ترکیب جدید به‌علت در معرض رطوبت قرار گرفتن سورفکتانت، روزانه قبل از انجام آزمایشات محلول جدیدی ساخته می‌شد. در ابتدا، سورفکتانت با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۵ رقم اعشار وزن شد. پس از آن، آب مقطر به آرامی و با استفاده از یک پیپت کالیبره اضافه شد. در مرحله بعدی برای پراکنده شدن سورفکتانت در فاز آبی، محلول در حمام اولتراسونیک به‌مدت h ۳-۲ قرار داده شد. طبق محاسبات، به‌منظور تهیه غلظت مد نظر به چند گرم از محلول ۵ CMC، آب مقطر اضافه می‌شد و سپس محلول آماده شده مجددا به‌مدت ۴۵ min در حمام اولتراسونیک قرار داده شد. به‌منظور تهیه محلول حاوی نانوذرات روش مشابهی اعمال شد و تنها به جای حمام اولتراسونیک از اولتراسونیک پروب‌دار (UHP-۴۰۰- شرکت پژوهش‌گران نانو فن‌آوری) به‌مدت ۱ h استفاده شد.

**جدول ۱** جدول سری‌های آزمایشات

| شماره سری | سورفکتانت سدیم دودسیل سولفات | سورفکتانت هگزا دسیل تری متیل آمونیم برمید | نانوذرات |
|---|---|---|---|
| ۱ | ☑ | - | - |
| ۲ | - | ☑ | - |
| ۳ | ☑ | - | ☑ |
| ۴ | - | ☑ | ☑ |

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۲۶-۱۷

به‌منظور ترکیب کردن محلول‌های حاوی نانوذرات و سورفکتانت، محلول حاوی سورفکتانت روی استیرر مغناطیسی قرار داده شده و سپس محلول حاوی نانوذرات با استفاده از سرنگ و به‌صورت قطره‌ای اضافه شد و در نهایت پس از آماده شدن، محلول مجددا به‌مدت 45 min در حمام اولتراسونیک قرار داده‌شد.

### اندازه‌گیری پایداری و ارتفاع فوم با استفاده از آزمایش‌های استاتیک

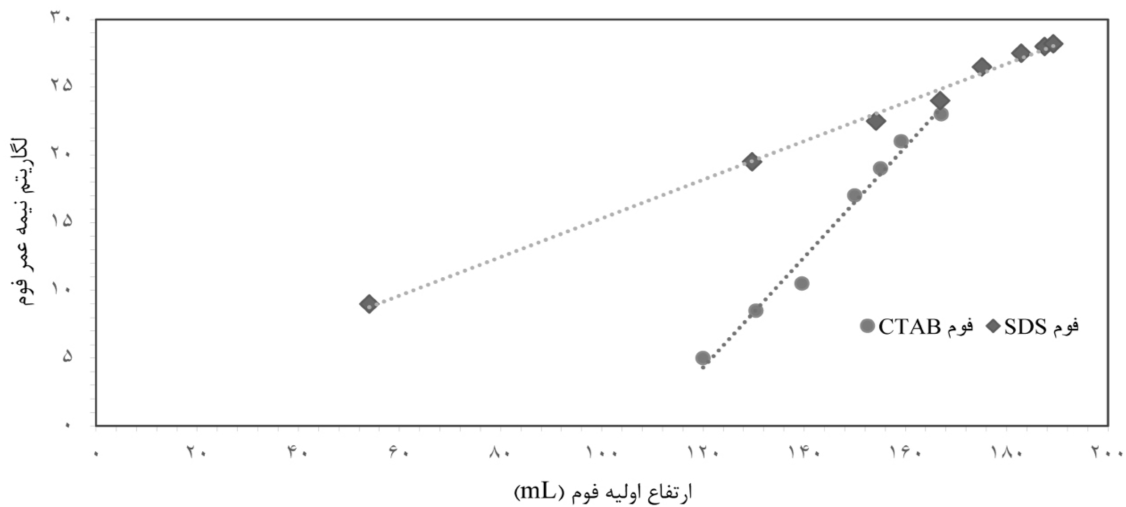
به‌منظور اندازه‌گیری قابلیت فوم‌زایی و پایداری فوم، آزمایش‌های استاتیک مطابق با استاندارد راس-میلز انجام شد [۱۹ و ۱۸]. مقدار 200 cc از محلول آماده شده در بورت و 50 cc در استوانه مدرج به آرامی ریخته شد. پس از 20 min (جهت پایدار شدن محلول) شیر بورت باز شده و بلافاصله پس از ریختن آخرین قطره محلول، ارتفاع فوم توسط کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد. در نهایت، مدت زمانی‌که طول کشید ارتفاع فوم به نصف ارتفاع اولیه برسد، به‌عنوان نیمه عمر فوم ثبت شد. تمامی آزمایشات استاتیک سه مرتبه با دقت بالا تکرار شد، با این حال که خطای آزمایشات کمتر از ۰/۵٪ بود مقادیر متوسط گزارش شده‌اند. به‌منظور کاهش خطای آزمایش تمام آزمایش‌های مربوط به هر سورفکتانت و حتی در شرایطی که نانو ذرات اضافه می‌شدند، در یک روز انجام شدند. با این روش، میزان خطا به‌علت تغییر دما، شرایط آزمایشگاه و حتی تحت تأثیر قرار گرفتن نتایج به‌علت بوی مواد شیمیایی مورد استفاده در آزمایشات دیگر به حداقل رسید.

### اندازه‌گیری کشش سطحی

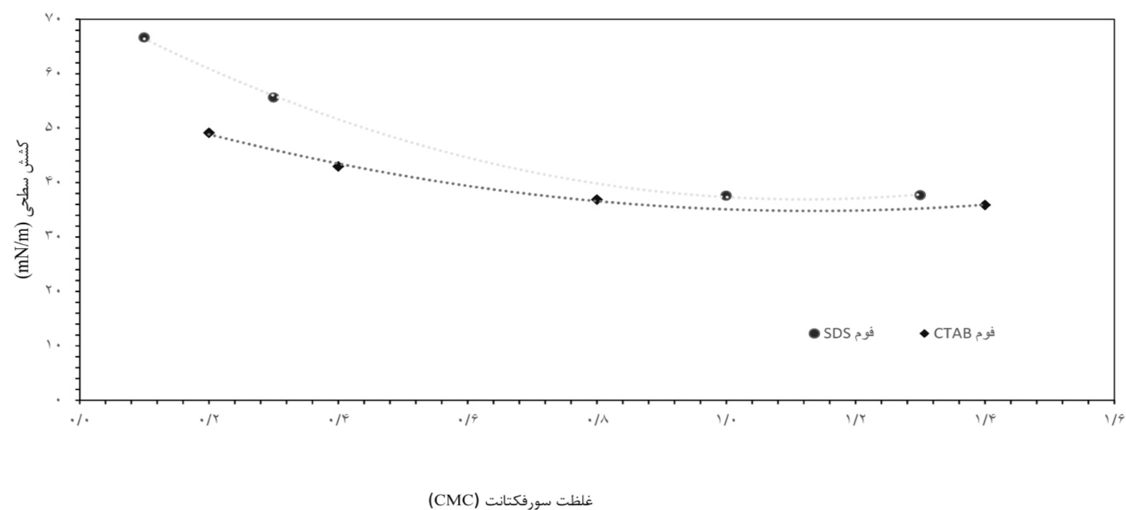
کشش سطحی محلول‌ها با استفاده از دستگاه 700 Sigma (Biolin scientific, Sweden) اندازه‌گیری شد. تمام محلول‌ها 4 h قبل از انجام آزمایش‌ها آماده و همه اندازه‌گیری‌ها در دما و فشار محیط انجام شده‌است. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری کشش سطحی برای برخی از غلظت‌های انتخاب شده براساس نتایج آزمایشات استاتیک برای دست‌یابی به اهداف مورد نظر انجام شد. مقدار 50 cc از محلول‌ها در بشر ریخته شده و پس از 20 min در دستگاه سیگما قرار داده شدند و در نهایت، عددی که دستگاه به آن همگرا شد به‌عنوان عدد کشش سطحی ثبت شد.

## ارائه و تحلیل نتایج

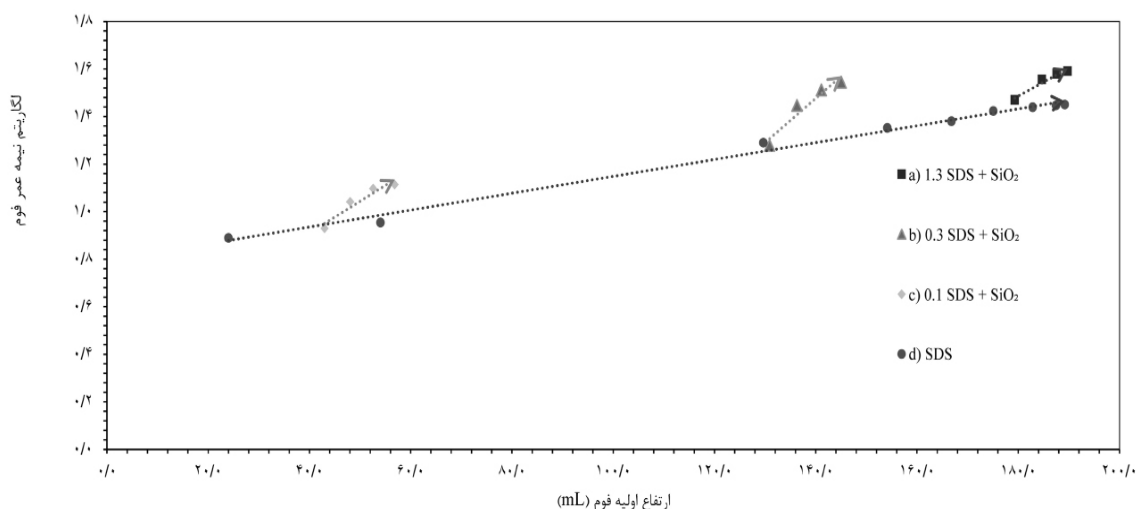
همان‌طور که در قسمت قبل ذکر شد، دو دسته آزمایش صورت گرفت: ۱) آزمایشات استاتیک که از طریق این آزمایش‌ها، ارتفاع (قابلیت فوم‌زایی) و نیمه عمر فوم (پایداری) اندازه‌گیری شد. ۲) براساس نتایج آزمایشات استاتیک، آزمایش‌های کشش سطحی در چندین غلظت انتخابی انجام شدند. در ادامه به بررسی و تحلیل نتایج می‌پردازیم. در ابتدا، آزمایشات استاتیک برای هر دو سورفکتانت، در غیاب نانوذرات انجام شد. در غلظت‌های مختلف سورفکتانت از CMC ۰/۵ تا CMC ۲، ارتفاع فوم و نیمه‌عمر ثبت شدند. براساس شکل ۱ نمودار نیمه‌عمر فوم براساس ارتفاع فوم در غلظت‌های مختلف سورفکتانت برای هر دو مورد صعودی و کاملاً خطی است ($R^2 \sim 1$) که این نتایج با مطالعات صورت‌گرفته مطابقت دارد و صحت آزمایش‌ها را تأیید می‌کند [۲۰]. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، هنگامی که غلظت سورفکتانت افزایش می‌یابد و به‌علت حضور مولکول‌های سورفکتانت بیشتر در سطح تماس، کشش سطحی کاهش یافته و پایداری فوم افزایش می‌یابد که به‌طور کامل با نتایج آزمایشات استاتیک مطابقت دارد. در مرحله بعد به‌منظور بررسی اثر نانوذرات و تعیین آرایش ذرات در سطح تماس، دو یا سه غلظت از هر سورفکتانت انتخاب شد. برای هر دو سورفکتانت، یکی از غلظت‌های انتخابی بیشتر از CMC ۱ بود. در هر غلظت سورفکتانت، غلظت‌های مختلفی از نانوذرات اضافه شد. در شکل ۳ نیمه‌عمر فوم براساس ارتفاع فوم برای سری‌های یک و سه رسم شده است




**شکل ۱** مقایسه تغییرات نیمه‌عمر فوم براساس ارتفاع اولیه فوم در دو سورفکتانت SDS و CTAB

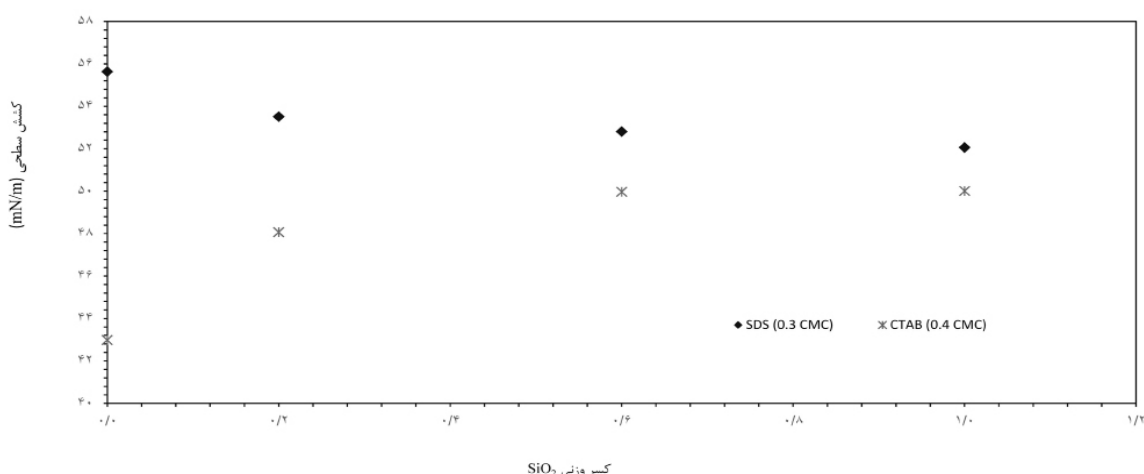



**شکل ۲** تغییرات کشش سطحی براساس غلظت سورفکتانت برای فوم تشکیل شده از سورفکتانت‌های SDS و CTAB

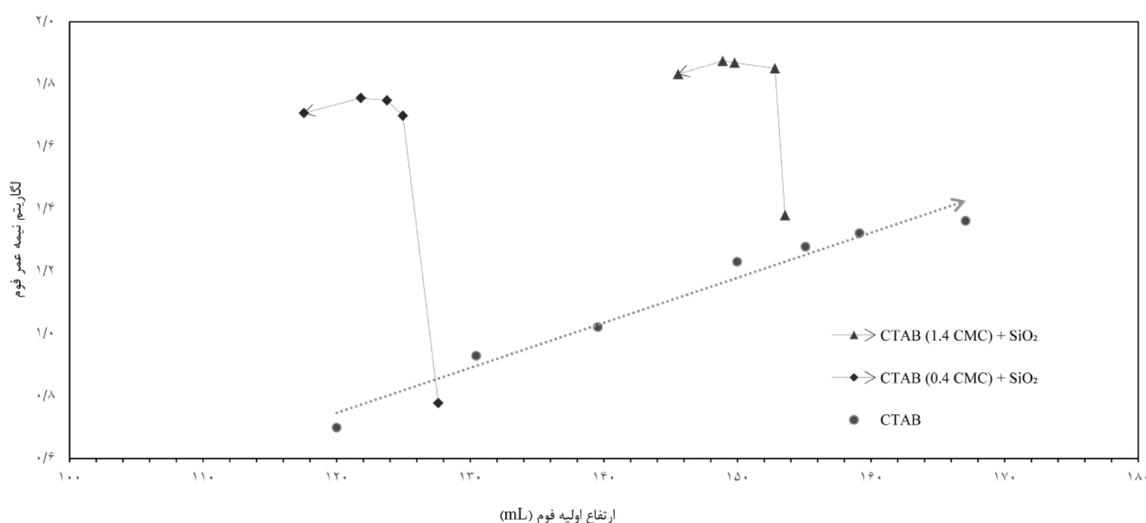



**شکل ۳** مقایسه نیمه‌عمر فوم (پایداری) برحسب ارتفاع اولیه فوم (فوم‌زایی) برای سورفکتانت SDS بدون حضور نانوذرات و در حضور نانوذرات

و در این شکل هر نقطه بیانگر یک غلظت است و افزایش غلظت در جهت فلش است. همان‌طورکه شکل ۴ نشان می‌دهد، در حضور SDS با افزایش کسر وزنی $SiO_2$ قابلیت فوم‌زایی و پایداری فوم به‌صورت خطی افزایش می‌یابد و این روند را می‌توان در سه غلظت انتخابی مشاهده کرد. براساس شکل ۳ زمانی‌که نانوذرات بیشتری به محلول اضافه می‌شود، ارتفاع فوم افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان فرض کرد که مولکول‌های سورفکتانت بیشتری در حضور نانوذرات به‌سطح تماس می‌رسند. برای صحت‌سنجی این فرض، آزمایش‌های کشش سطحی مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۴ نشان می‌دهد که افزایش غلظت نانوذرات در یک غلظت ثابت سورفکتانت، کشش سطحی را کاهش می‌دهد، لازم به ذکر است در این شکل غلظت در جهت فلش‌ها افزایش می‌یابد. کاهش کشش سطحی نشان‌دهنده وجود سورفکتانت بیشتری در سطح تماس است. در نتیجه می‌توان گفت که نیروهای دافعه بین مولکول‌های سورفکتانت و نانوذرات و همچنین اندازه بسیار کوچک‌تر مولکول‌های سورفکتانت در مقایسه با نانوذرات، باعث می‌شود مولکول‌های سورفکتانت بیشتری به‌سطح تماس برسند [۲۰]. هنگامی‌که از سورفکتانت CTAB استفاده شد، روند متفاوتی مشاهده شد. در شکل ۵ نیمه‌عمر فوم براساس ارتفاع فوم برای سری‌های دو و چهار رسم شده است و در این شکل هر نقطه بیانگر یک غلظت است و افزایش غلظت درجهت فلش است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، با افزایش غلظت $SiO_2$ در یک غلظت ثابت CTAB، ارتفاع فوم کاهش می‌یابد اما پایداری فوم بیشتر می‌شود. تشکیل فوم کمتر به این معنی است که سورفکتانت کمتری به‌سطح تماس رسیده است که نتایج کشش سطحی طبق شکل ۴ نیز این فرض را تأیید می‌کند. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، در غلظت‌های بالاتر نانوذرات، کشش سطحی بیشتر است و بیانگر این امر است که مولکول‌های سورفکتانت کمتری در سطح تماس وجود دارند. علی‌رغم کاهش قابلیت فوم‌زایی و افزایش کشش سطحی، که به‌صورت طبیعی به‌علت کاهش حضور مولکول‌های سورفکتانت در سطح تماس باید پایداری فوم را کاهش دهد، پایداری افزایش می‌یابد. براساس این مشاهدات، می‌توان استنباط کرد که دلیل حضور کمتر مولکول‌های سورفکتانت در سطح تماس درگیرشدن با نانوذرات است و طبق مشاهدات این مطالعه و همچنین نتایج مطالعات پیشین می‌توان نتیجه گرفت افزایش پایداری به‌علت حضور نانوذرات در سطح تماس است [۱۲ و ۲۱،۲۲].



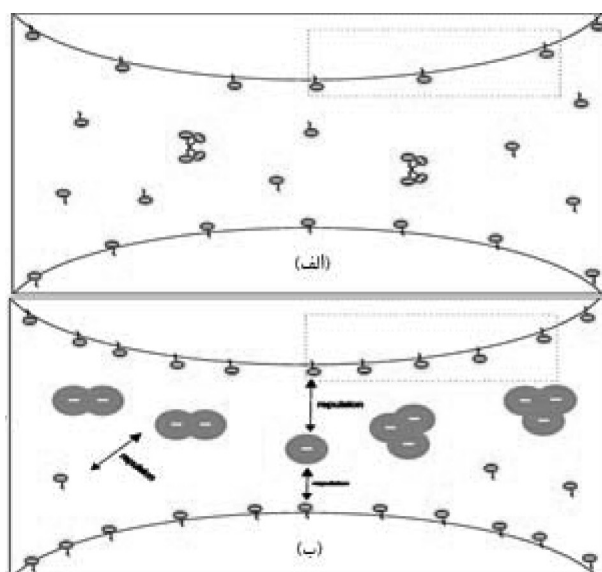

**شکل ۴** تغییرات کشش سطحی براساس غلظت $SiO_2$ برای فوم تشکیل شده از ۰/۳ CMC سورفکتانت SDS و ۰/۴ CMC سورفکتانت CTAB



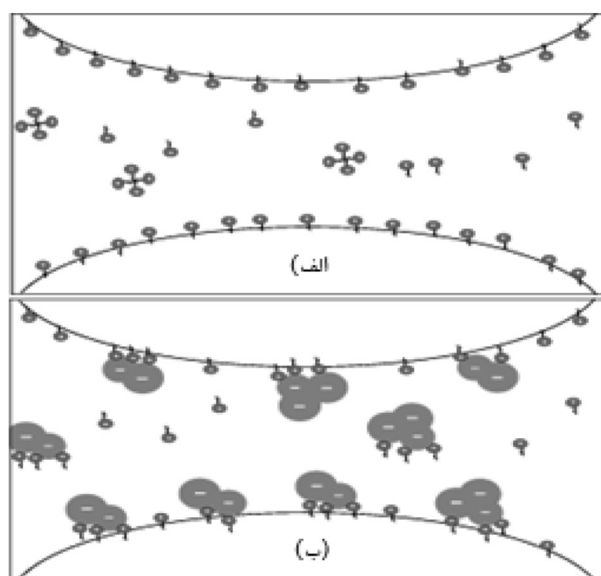

**شـــکل ۵** مقایســه نیمه‌عمـر فـوم (پایـداری) برحسـب ارتفـاع اولیـه فـوم (فومزایـی) بـرای سـورفکتانت CTAB بـدون حضـور و در حضـور نانـوذرات

اگرچـه آرایـش مولکول‌هـای سـورفکتانت و نانـوذرات به‌طـور مختصـر در پاراگراف‌هـای قبلـی توضیـح داده شـد، ایـن پاراگـراف آن را بـا جزئیـات بیشـتری موشـکافی می‌کنـد. همان‌طور کـه در شکل ۶ مشخص اسـت، در حالتـی کـه هـم بـار سـورفکتانت و هـم بـار نانـوذرات منفـی هسـتند (سیسـتم فـوم هـم بـار)، دافعـه الکترواسـتاتیک از نزدیـک شـدن مولکول‌هـای سـورفکتانت و نانـوذرات جلوگیـری می‌کنـد. بدیهـی اسـت کـه مولکول‌هـای سـورفکتانت بسـیار سـبک‌تر از نانـوذرات هسـتند. مولکلول‌هـای سـورفکتانت به‌دلیـل وزن کمتـر، یـک سـر آب دوسـت و یـک سـر آب‌گریـز، تمایـل بیشـتری بـرای رفتـن به‌سـطح تمـاس دارنـد. در نتیجـه، وجـود نانـوذرات در فیلـم مایـع به‌عنـوان یـک محـرک بـرای مولکول‌هـای سـورفکتانت عمـل می‌کنـد و نیـروی دافعـه باعـث می‌شـود مولکول‌هـای سـورفکتانت موجـود در فیلـم مایـع به‌سـطح تمـاس برسـند. بـا توجـه بـه دلایـل ذکـر شـده، اسـتفاده از نانـوذرات به‌همـراه سـورفکتانت معـادل اسـت بـا اسـتفاده از غلظت‌هـای بیشـتر سـورفکتانت و در نتیجـه قابلیـت فومزایـی را افزایـش می‌دهـد. همان‌طـور کـه در پاراگراف‌هـای بـالا اشـاره شـد، در حالـت دوم (سـورفکتانت کاتیونـی و نانـوذرات آنیونـی)، بـا افزایـش غلظـت $SiO_2$، برخـلاف پایـداری فـوم و کشـش سـطحی، فومزایـی کاهـش می‌یابـد. در ایـن حالـت، نانـوذرات و مولکول‌هـای سـورفکتانت به‌دلیـل بارهـای متفـاوت یکدیگـر را جـذب می‌کننـد. همان‌طـور کـه در شکل ۷ نشـان داده شـده اسـت، ایـن جاذبـه ترکیـب جدیـدی از نانـوذرات و مولکول‌هـای CTAB را ایجـاد می‌کنـد. در واقـع سـر مولکول‌های سـورفکتانت بـه نانوذرات متصـل شـده و ترکیبـی ایجـاد می‌کنـد کـه دارای یـک سـر آب دوسـت و یـک سـر آب‌گریـز اسـت، بنابرایـن می‌توانـد به‌عنـوان یـک مولکـول سـورفکتانت عمـل کنـد. هماننـد مولکول‌هـای سـورفکتانت، ترکیـب تشـکیل شـده نیـز تمایـل دارد به‌سـطح تمـاس برسـد. افزایـش انـرژی جداسـازی ذرات و کاهـش نفـوذ مولکولـی به‌دلیـل وجـود نانـوذرات در سـطح تمـاس، پایـداری را بـه میـزان قابـل توجهـی افزایـش می‌دهـد. بدیهـی اسـت کـه به‌دلیـل درگیـر شـدن مولکول‌هـای سـورفکتانت بـا نانـوذرات و تشـکیل ترکیبـات ذکـر شـده مولکول‌هـای سـورفکتانت کمتـری به‌سـطح تمـاس می‌رسـند، پـس فومزایـی کاهـش و کشـش سـطحی افزایـش می‌یابـد.

پـس از بررسـی آرایـش ذرات می‌تـوان بـه بررسـی اثـر مارانگونـی بـر پایـداری فـوم در حضـور نانـوذرات پرداخـت. جهـت بررسـی و مقایسـه اثـر مارانگونـی از عـدد مارانگونـی کـه در رابطـه ۱ تعریـف شـده اسـت اسـتفاده می‌شـود.




**شـکل ۶** الـف) چیدمـان مولکول‌هـای SDS در لامـلا و سـطح تمـاس در غیـاب نانـوذرات و ب) آرایـش مولکول‌هـای SDS و نانـوذرات در لامـلا و سـطح تمـاس




**شـکل ۷** الـف) چیدمـان مولکول‌هـای CTAB در لامـلا و سـطح تمـاس در غیـاب نانـوذرات و ب) آرایـش مولکول‌هـای CTAB و نانـوذرات در لامـلا و سـطح تمـاس.

عـدد مارانگونـی (Ma) عـدد بی‌بعـدی اسـت کـه از نسـبت نیـروی کشـش سـطحی بـه نیـروی ویسـکوزیته حاصـل می‌شـود. افزایـش ایـن عـدد به‌منزلـه افزایـش گرادیـان کشـش سـطحی اسـت کـه عامـل رخـداد اثـر مارانگونـی اسـت. در ایـن مطالعـه، اثـر مارانگونـی طبـق رابطـه ۱ بـا اسـتفاده از گرادیـان کشـش سـطحی بـر غلظـت نانـوذرات مـورد بررسـی قـرار گرفتـه اسـت [۲۳ و ۱۱]. نتایـج جـدول ۲ نشـان می‌دهـد کـه گرادیـان کشـش سـطحی بـا افزایـش غلظـت نانـوذرات در یـک سیسـتم همبـار افزایـش مـی یابـد. ایـن افزایـش شـیب کششـی سـطحی نشان‌دهنده افزایـش عـدد مارانگونـی و در نتیجـه تأثیـر مثبـت اثـر مارانگونـی اسـت کـه ثبـات کـف را افزایـش می‌دهـد. برخـلاف سیسـتم فـوم همبـار، در سیسـتم فـوم ناهمبـار، گرادیـان کشـش سـطحی بـا افزایـش غلظـت نانـوذرات کاهـش می‌یابـد. همان‌طـور کـه ذکـر شـد در سیسـتم ناهمبـار، نانـوذرات به‌سـطح

**جدول ۲** نتایج مربوط به تغییرات کشش سطحی براساس غلظت نانوذرات برای بررسی اثر مارانگونی

| سدیم دودسیل سولفات (CMC) | هگزا دسیل تری متیل آمونیم برمید (CMC) | نانوذرات کسر وزنی | \|dσ/dC\| |
|---|---|---|---|
| ۰/۳ | – | ۰/۲ | ۱/۶۹ |
| ۰/۳ | – | ۰/۶ | ۱/۸۱ |
| ۰/۳ | – | ۱ | ۱/۹۳ |
| – | ۰/۴ | ۰/۲ | ۶/۰۸ |
| – | ۰/۴ | ۰/۶ | ۳/۴۳ |
| – | ۰/۴ | ۱ | ۰/۷۷ |

تماس می‌رسند. بنابراین، وجود ذرات جامد در سطح تماس باعث می‌شوند سطح تماس جامد شود [۱۲] و جامد مانند شدن سطح مانع جریان یافتن سورفکتانت در سطح تماس می‌شود. لذا در این سیستم جریان مارانگونی اتفاق نمی‌افتد.

$$M \alpha \frac{1}{\mu D}.\frac{d\sigma}{dC} \quad (۱)$$

μ ویسکوزیته، D ضریب نفوذمولکولی، σ کشش سطحی، C غلظت و M عدد مارانگونی است.

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه به‌منظور بررسی تأثیر جریان مارانگونی در حضور نانوذرات و آرایش نانوذرات و مولکول‌های سورفکتانت در لاملا بر پایداری فوم دو سیستم همبار و ناهمبار فوم به‌صورت هم‌زمان و در شرایط یکسان مورد مطالعه قرار گرفتند. برای هر دو سیستم آزمایشات مشابه در شرایط یکسان انجام شدند تا رفتار دو سیستم مقایسه شود و عوامل مؤثر در پایداری آن‌ها مشخص شود. بدین منظور، آزمایش‌های استاتیک جهت اندازه‌گیری پایداری فوم‌زایی و اندازه‌گیری کشش سطحی انجام شدند. همه آزمایشات ذکر شده برای چهار سری فوم تشکیل شده از: ۱) سورفکتانت SDS، ۲) سورفکتانت CTAB ۳) سورفکتانت SDS و نانوذرات $SiO_2$ (سیستم همبار) و ۴) سورفکتانت CTAB و نانوذرات $SiO_2$ (سیستم ناهمبار) انجام شدند. نتایج حاصل از این مطالعه در ادامه ذکر شده‌اند.

- حضور نانوذرات باعث افزایش پایداری فوم در هر دو سیستم مورد مطالعه می‌شود درحالی‌که فوم‌زایی برخلاف سیستم همبار در سیستم ناهمبار کاهش می‌یابد.
- در سیستم فوم نانوذرات آنیونی-سورفکتانت آنیونی (همبار)، نیروهای دافعه بین نانوذرات و مولکول‌های سورفکتانت باعث می‌شود مولکول‌های سورفکتانت بیشتری به‌سطح تماس برسند و در نتیجه پایداری فوم افزایش می‌یابد. علاوه‌براین، جریان مارانگونی با جریان تخلیه فیلم مایع مقابله می‌کند و عامل دیگر پایداری فوم است.
- در سیستم فوم سورفکتانت کاتیونی-نانوذرات آنیونی (ناهمبار)، عامل اصلی که پایداری فوم را بهبود می‌بخشد، وجود ترکیب‌های تشکیل شده از مولکول‌های سورفکتانت و نانوذرات در سطح تماس است. حضور این ترکیب‌ها در سطح تماس، انرژی جداسازی ذرات را افزایش می‌دهد و پایداری فوم را افزایش می‌دهد. برخلاف سیستم همبار در این سیستم، الاستیسیته بالای سطح مانع جریان مارانگونی می‌شود.

## مراجع

[1]. Green D W, Willhite G P (1998) Enhanced oil recovery, Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers.
[2]. Singh R, Mohanty K K (2016) Foams stabilized by in-situ surface-activated nanoparticles in bulk and porous media, SPE Journal, 21: 121-130.
[3]. Maini B Ma V (1984) Relationship between foam stability measured in static tests and flow behavior of foams in porous media, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro.
[4]. Sohrabi M, Danesh A, Tehrani D H, Jamiolahmady M (2008) Microscopic mechanisms of oil recovery by near-miscible gas injection, Transport in Porous Media, 72: 351-367.
[5]. Madadizadeh A, Sadeghein A, Riahi S (2020) The use of nanotechnology to prevent and mitigate fine migration: a comprehensive review, Reviews in Chemical Engineering.
[6]. Khoshnevis N, Mahani H, Rehling J (2017) Investigation of pressure transient behavior during Injection Fall-off (IFO) test in foam flooding, Journal of Petroleum Science and Engineering,149: 860–872.
[7]. Shojaiepour M, Rashidi F, Dabir B, Amirsardari M (2021) Investigation of foam injection scenarios to control the gas oil ratio in carbonate reservoirs with permeability heterogeneity: simulation of the process in an oil reservoir sector, Journal of Petroleum Research, 31, 119: 3-14.
[8]. Khoshkalam Y, Khosravi M, Rostami B (2019) An experimental investigation on foam injection in a fractured matrix: effect of viscous cross flow, Journal of Petroleum Research, 29, 98-2: 61-71.
[9]. Weber E H (1854) Mikroskopische beobachtungen sehr gesetzmäβiger bewegungen, welche die bildung von niederschlgen harziger körper aus weingeist begleiten berichte über die verhandlungender königlich schsischen gesellschaft der wissenschaften, Mathematisch–Physische Classe, 57.
[10]. Thiele R, Brettschneider O, Repke J U, Thielert H, Wozny G (2003) Experimental investigations of foaming in a packed tower for sour water stripping, Industrial and Engineering Chemistry Research, 42: 1426-1432.
[11]. Khosravi M, Bahramian A, Emadi M, Rostami B, Roayaie E (2014) Effect of Marangoni flow on recovery of bypassed oil during $CO_2$ injection, Journal of Petroleum Science and Engineering, 114: 91-98.
[12]. Singh R, Mohanty K K (2014) Synergistic stabilization of foams by a mixture of nanoparticles and surfactants, SPE Improved Oil Recovery Symposium, OnePetro.
[13]. Nguyen P, Fadaei H, Sinton D (2014) Nanoparticle stablized $CO_2$ in water foam for mobility control in enhanced oil recovery via microfluidic method, SPE Heavy Oil Conference-Canada, OnePetro.
[14]. Ma H, Luo M, Dai L L (2008) Influences of surfactant and nanoparticle assembly on effective interfacial tensions, Physical Chemistry Chemical Physics, 10: 2207-2213.
[15]. Maestro A, Rio E, Drenckhan W, Langevin D, Salonen A (2014) Foams stabilised by mixtures of nanoparticles and oppositely charged surfactants: relationship between bubble shrinkage and foam coarsening, Soft Matter, 10: 6975-6983.
[16]. Yang W, Wang T, Fan Z, Miao Q, Deng Z, Zhu Y (2017) Foams stabilized by in situ-modified nanoparticles and anionic surfactants for enhanced oil recovery, Energy and Fuels, 31: 4721-4730.
[17]. Zhao J, Torabi F, Yang J (2021) The synergistic role of silica nanoparticle and anionic surfactant on the static and dynamic $CO_2$ foam stability for enhanced heavy oil recovery: An experimental study, Fuel, 287: 119443.
[18]. Rosen M, Solash J (1969) Factors affecting initial foam height in the Ross-Miles foam test, Journal of the American Oil Chemists› Society, 46: 399-402.
[19]. John R, Miles, G. D (1941) An apparatus for comparison of foaming properties of soaps and detergents, Oil and Soap, 18, 5: 99–102.
[20]. Vatanparast H, Samiee A, Bahramian A, Javadi A (2017b) Surface behavior of hydrophilic silica nanoparticle-SDS surfactant solutions: I. Effect of nanoparticle concentration on foamability and foam stability, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 513: 430-441.
[21]. Binks B P, Lumsdon S (2000) Influence of particle wettability on the type and stability of surfactant-free emulsions, Langmuir, 16: 8622-8631.
[22]. Vatanparast H, Javadi A, Bahramian A (2017a) Silica nanoparticles cationic surfactants interaction in water-oil system, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 521: 221-230.
[23]. Saranjam N, Chandra S, Mostaghimi J, Fan H, immer J (2016) Orange peel formation due to surface tension-driven flows within drying paint films, Ournal of Coatings Technology and Research, 13, 3: 413–426.

# بهینه‌سازی کاتالیست $Ni/Al_2O_3$ برای فرآیند ریفرمینگ خشک متان در راکتور میکروکانالی

سید رضا یحیوی و غلامرضا مرادی*
آزمایشگاه کاتالیست، دانشکده نفت و پتروشیمی، دانشگاه رازی کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲

**چکیده**

غیرفعال شدن کاتالیست‌های $Ni/Al_2O_3$ در فرآیند ریفرمینگ خشک متان همواره یکی ازمشکلات این فرآیند می‌باشدکه بسیار مورد توجه محققان بوده است. استفاده از کبالت به عنوان تقویت کننده‌های فاز فعال و اکسید منیزیم جهت بهبود پایداری کاتالیست در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای توزیع بهتر کاتالیست و انتقال حرارت بهتر از راکتور میکرو کانالی استفاده شد. بنابراین کاتالیست‌های $Ni\text{-}Co/Al_2O_3\text{-}MgO$ تهیه و عملکرد آنها در راکتور میکروکانالی در دمای ۵۰۰ تا ۸۰۰ °C و فشار ۱ atm با نسبت مولی خوراک $CH_4/CO_2=1$ و سرعت فضایی ۲۴ L/g.h بررسی گردید. در این پژوهش، تأثیر افزودن بهبود دهنده ها برکارآیی کاتالیست های سنتز شده بررسی گردید و نسبت بهینه Ni/Co برابر ۵ در ساختار کاتالیست استفاده شده در میکروراکتور بدست آمد. مشخصات نمونه های سنتز شده توسط آنالیزهای BET، XRD و FESEM بررسی گردید. استفاده همزمان از کبالت و اکسید منیزیم باعث بیشتر شدن فعالیت کاتالیست و پایدارتر شدن آن در طی 18 h آزمایش می‌گردد.

**کلمات کلیدی: کاتالیست، ریفرمینگ، متان، هیدروژن،راکتورمیکرو کانالی.**

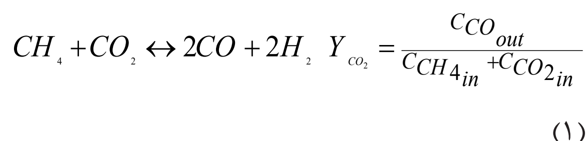
## مقدمه

یافتن جایگزین یک منبع انرژی جدید به جای منابع سوخت های فسیلی با توجه به تجدید ناپذیر بودن این منابع انرژی، همواره یک چالش اساسی برای دانشمندان می‌باشد. از طرفی، رفع مشکلات زیست محیطی ناشی از فعالیت بشری از جمله حذف گازهای گلخانه‌ای همواره یک چالش بزرگ بوده است [۱]. به علاوه با توجه به نیاز بازارهای مصرف، تبدیل گاز طبیعی به یک سوخت مایع در سال‌های اخیر مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. تبدیل مستقیم گاز طبیعی به سوخت مایع یکی از فرآیندهایی است که به دلیل پیچیده بودن صنعتی نشده است. در کنار تبدیل مستقیم، روش تبدیل غیرمستقیم وجود دارد که در طی آن ابتدا گاز طبیعی به گاز سنتز (مخلوط هیدروژن و کربن مونوکسید) تبدیل می‌شود و در ادامه طی واکنش‌هایی نظیر فیشرتراپش، هیدروکربن های مایع تولید می‌شود [۲].

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی gmoradi@razi.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4782.3155)

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱ ، صفحه ۳۵-۲۷

روش‌های گوناگونی برای تبدیل گاز طبیعی به گاز سنتز وجود دارد که می‌توان به ریفرمینگ متان با بخار آب [۳]، ریفرمینگ خودگرمایی[۱] [۴]، اکسیداسیدن جزئی [۵] و ریفرمینگ متان با کربن دی اکسید (ریفرمینگ خشک) اشاره کرد. باید در نظر داشت که هر چه نسبت $H_2/CO$ در مخلوط گاز سنتز مورد استفاده به ۱ نزدیک تر باشد، امکان تولید هیدروکربن مایع به طول زنجیر کربن بیشتر، بالاتر می‌رود. ازین رو فرآیند ریفرمینگ خشک متان به دلیل تولید گاز سنتز با نسبت $H_2/CO$ برابر با ۱، برای تولید گاز سنتز مورد نیاز برای فرآیندهای مایع‌سازی مورد توجه قرار گرفته است. همچنین با توجه به حذف دو گاز گلخانه‌ای متان و کربن دی اکسید طی فرآیند و تبدیل آنها به مواد با ارزش و نیز، عدم نیاز به فرآیندهای خالص‌سازی، ریفرمینگ خشک متان[۲] جایگاه ویژه‌ای دارد. واکنش ریفورمینگ خشک به صورت زیر است:

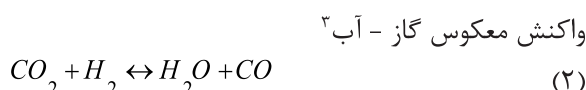


$$CH_4 + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 2H_2 \quad Y_{CO_2} = \frac{C_{CO_{out}}}{C_{CH_{4in}} + C_{CO_{2in}}}$$

(۱)

در کنار واکنش ریفورمینگ، واکنش‌های جانبی نیز انجام می‌شود که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

واکنش معکوس گاز - آب[۳]



$$CO_2 + H_2 \leftrightarrow H_2O + CO \qquad (۲)$$

واکنش تجزیه متان[۴]



$$CH_4 \leftrightarrow C + 2H_2 \qquad (۴)$$

واکنش بودوارد[۵]



$$2CO \leftrightarrow C + CO_2 \qquad (۵)$$

فلزات نجیب پلاتین (Pt)، روتنیوم (Rh) و رودیوم (Ru) فعالیت بالایی در فرآیند ریفرمینگ خشک متان از خود در این نشان می‌دهند [۶]. اما به دلیل قیمت بالا و در دسترس نبودن از مرحله صنعتی استفاده چشمگیری ندارند. در مقابل، فلزات واسطه نظیر نیکل (Ni) و کبالت (Co) نیز فعالیت قابل قبولی در فرآیند ریفرمینگ متان با کربن دی اکسید از خود نشان می‌دهند و به دلیل دسترسی آسان‌تر و هزینهٔ پایین‌تر برای این فرآیند مد نظر هستند [۷]. اما از آن جایی که فرآیند ریفرمینگ خشک متان گرماگیر است، انجام فرآیند در دمای بالا باعث رسوب کربن روی کاتالیست [۸، ۷] و کلوخه شدن [۹] و نهایتاً غیرفعال شدن کاتالیست و کاهش انتخاب‌پذیری می‌شود. از این رو، ساخت کاتالیست های دوفلزی به دلیل خواص مختلف شیمیایی تحت تأثیر اثر متقابل دو فلز می‌تواند امکان ساخت یک کاتالیست خوب را فراهم سازد [۱۱، ۱۰].
کبالت، پلاتین، مس، روتنیوم و رودیوم فلزاتی هستند که استفاده از آن ها به عنوان تقویت کننده فاز فعال، نتایج خوبی در کارایی کاتالیست از خود نشان داده اند [۱۷-۱۲].

افزودن تقویت کننده به پایه نیز با توجه به تغییر خواص فیزیکی وشیمیایی پایه، بسیار گزارش شده است. افزودن MgO به دلیل مقاومت حرارتی بالا [۱۸]، $CeO_2$ به دلیل خاصیت اکسیژن رسانی به کاتالیست در طول فرآیند [۱۹] و $ZrO_2$ به دلیل مقاومت در برابر رسوب کربن [۲۰] به پایه باعث فعالیت پایدار کاتالیست در طول فرآیند می‌شوند. سنتز کاتالیست‌های نیکل، با روش‌هایی چون تلقیح، هم رسوبی و سل ژل گزارش شده است. در این مقاله سنتز کاتالیست‌های تقویت شده نیکل و استفاده از بهبود دهنده در پایه و فاز فعال را بررسی خواهیم کرد وپس از تعیین خصوصیات فیزیکی نمونه‌های سنتز شده، ارزیابی عملکرد این کاتالیست‌ها در میکرورآکتور را گزارش خواهیم کرد.

## مواد، تجهیزات و روش‌ها

### مواد مورد استفاده برای سنتز کاتالیست‌ها

به منظور سنتز کاتالیست $Ni\text{-}Co/Al_2O_3\text{-}MgO$ از مواد زیر استفاده شده است:

نیترات منیزیم $(Ni(NO_3)_2.6H2O)$ به عنوان پیش ماده فاز فعال.

1. Auto thermal
2. Dry Reforming of Methane (DRM)
3. Reverse Water – Gas Shift Reaction (RWGSR)
4. Methane Decomposition Reaction
5. Boudouard Reaction

نیترات کبالت ($Co(NO_3)_2.6H_2O$) به عنوان پیش ماده تقویت کننده فاز فعال.

گاما آلومینا ($\gamma$-$Al_2O_3$) به عنوان پایه کاتالیست.

نیترات منیزیم ($Mg(NO_3)_2.3H_2O$) به عنوان پیش ماده تقویت کننده پایه.

آب دیونیزه، متانول و استون به عنوان حلال.

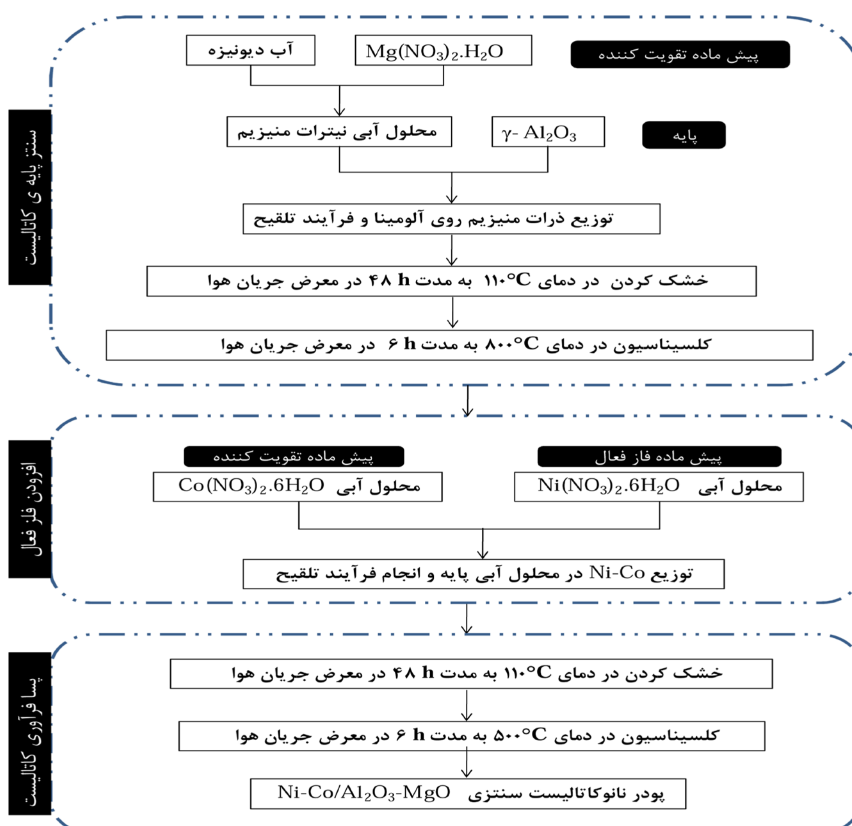
تمامی مواد شیمیایی مورد استفاده، از محصولات شرکت "مرک" می‌باشند. آب دیونیزه مورد استفاده، از مرکز آزمایشگاهی دانشگاه رازی کرمانشاه تهیه شده است.

## روش سنتز کاتالیست

سنتز نمونه‌ها همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است درسه مرحله آماده‌سازی پایه و افزودن فاز فعال و پسافرآوری کاتالیست دنبال می‌شود که به طور کامل به شرح زیر است:

تهیه محلول آبی نیترات منیزیم و افزودن گاما آلومینابه آن که برای پخش کردن ذرات منیزیم روی پایه آلومینیوم و انجام فرآیند تلقیح، از روش هم‌زدن مکانیکی استفاده شده است. پس از تهیه محلول پیش ماده پایه، خشک کردن در معرض جریان هوا و در دمای ۱۱۰ °C و سپس کلسیناسیون در دمای ۸۰۰ °C انجام گرفته است.

پس از تهیهٔ پایهٔ کاتالیست، پیش ماده‌های نیکل و کبالت به صورت محلول آبی به محلول آبی پایه افزوده شده و مجددا عمل تلقیح انجام می‌شود. سپس فرآیند خشک کردن نمونه‌ها در معرض جریان هوا و در دمای ۱۱۰ °C انجام می‌گیرد. کلسیناسیون نهایی نمونه‌ها نیز در دمای ۵۰۰ °C تکمیل شده و نهایتا نمونه‌ها به صورت پودری شکل تهیه شدند.




**شکل ۱** نمودار جریانی سنتز کاتالیست $Ni$-$Co/Al_2O_3$-$MgO$ به روش تلقیح.

همچنین مقادیر نسبی فاز فعال و پایه در جدول ۱ نشان داده شده است.

**جدول ۱** مقادیر نسبی فاز فعال و پایه در نمونه‌های سنتزی.

| نام کاتالیست | نسبت Ni/Co | نسبت Al/Mg |
|---|---|---|
| $Ni/Al_2O_3$ | --- | --- |
| $Ni\text{-}Co/Al_2O_3$ | ۵ | --- |
| $Ni/Al_2O_3\text{-}MgO$ | --- | ۵ |
| $Ni\text{-}Co/Al_2O_3\text{-}MgO$ | ۵ | ۵ |
| $Ni\text{-}Co/Al_2O_3\text{-}MgO$ | ۳ | ۵ |

### تعیین خصوصیات نمونه‌های سنتزی

برای مطالعه ساختار کریستالی نمونه‌های سنتز شده از آنالیز پراش اشعه ایکس[1] انجام شده است. اندازه‌گیری سطح مخصوص و حجم کلی حفره‌های نمونه‌ها از طریق آنالیز جذب و دفع نیتروژن[2] صورت گرفت و برای بررسی مورفولوژی سطح نمونه‌ها نیز آنالیز تصویربرداری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی[3] به خدمت گرفته شده است.

### سیستم ارزیابی کاتالیست‌ها

در این تحقیق از راکتورمیکرو کانالی طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه کاتالیست دانشگاه رازی استفاده شده است [۲۱]. بدین ترتیب که روی دو صفحه از جنس فولاد ضد زنگ، میکرو کانال‌ها ایجاد شده اند و یک صفحه از جنس فولاد ضد زنگ که در هر دو سمت ان پوشش کاتالیستی ایجاد شده است بین دو صفحه کانالیزه شده، به صورت ساندویچی قرار می‌گیرد. شکل کلی راکتورمیکرو کانالی در پیوست الف نشان داده شده است.

هر صفحه کانالیزه شده دارای ۲۶ میکروکانال به عرض و عمق ۱ mm و ۰/۵ mm به ترتیب است.قبل از پوشش‌دهی کاتالیست روی صفحه استیل، سطح آن کاملاً سمباده زنی شده و درون محلول استون قرار گرفته است. سپس تحت امواج اولتراسوند، به مدت ۱۰ min قرار داده شده است تا هیچ گونه آلودگی روی آن نباشد. پودر کاتالیست سنتز شده، توسط متانول به حالت یک دوغاب در آمده و روی صفحه فولادی پوشش داده شده است. صفحه پوشش داده شده به مدت ۸ h در یک آون با دمای ۱۰۰ °C در معرض جریان هوا خشک شده است و برای اطمینان از چسبیدن پودر کاتالیست به صفحه به مدت ۳ h در یک کوره با دمای ۵۰۰ °C قرار گرفته است.

سیستم ارزیابی عملکرد کاتالیست‌های سنتزی از سه بخش ورود خوراک، واکنش و قسمت آنالیز گازهای خروجی تشکیل شده است. خوراک با نسبت ۱ $CH_4/CO_2$= وارد راکتور می‌شود. محدوده دمای واکنش ۸۰۰-۵۰۰°C می‌باشد. برای فعال کردن کاتالیست‌های سنتزی، عملیات احیا نمونه‌های سنتزی با هیدروژن به مدت ۱ h در دمای ۷۰۰°C انجام شده است.فشار واکنش ۱ bar و سرعت فضایی گاز[4] برابر با ۲۴ L/g.h در نظر گرفته شده است. برای محاسبات میزان تبدیل و همچنین بازدهی فرآیند از روابط زیر استفاده شده است:

$$X_i = \frac{C_{i\,in} - C_{i\,out}}{C_{i\,in}}, i: CH_4 \& CO_2 \quad (۵)$$

$$Y_{H_2} = \frac{CH_{2\,out}}{2CCH_{4\,in}} \quad (۶)$$

$$Y_{CO_2} = \frac{CCO_{out}}{CCH_{4\,in} + CCO_{2\,in}} \quad (۷)$$

برای تنظیم دبی گاز ورودی به رآکتور (خوراک) از کنترل کننده‌های جرمی جریان استفاده شده است که قبل از اندازه‌گیری دبی، بر اساس گازهای تزریقی، کالیبره شده‌اند. برای آنالیز خوراک و محصولات واکنش نیز از دستگاه کروماتوگرافی گازی با شناساگرهای FID و TCD استفاده شده است که بر اساس گازهای متان، هیدروژن، کربن دی اکسید و کربن مونو اکسید کالیبره می‌باشد.

1. X-ray Diffraction (XRD)
2. BET analysis
3. FESEM
4. Gas Hourly Space Velocity (GHSV)

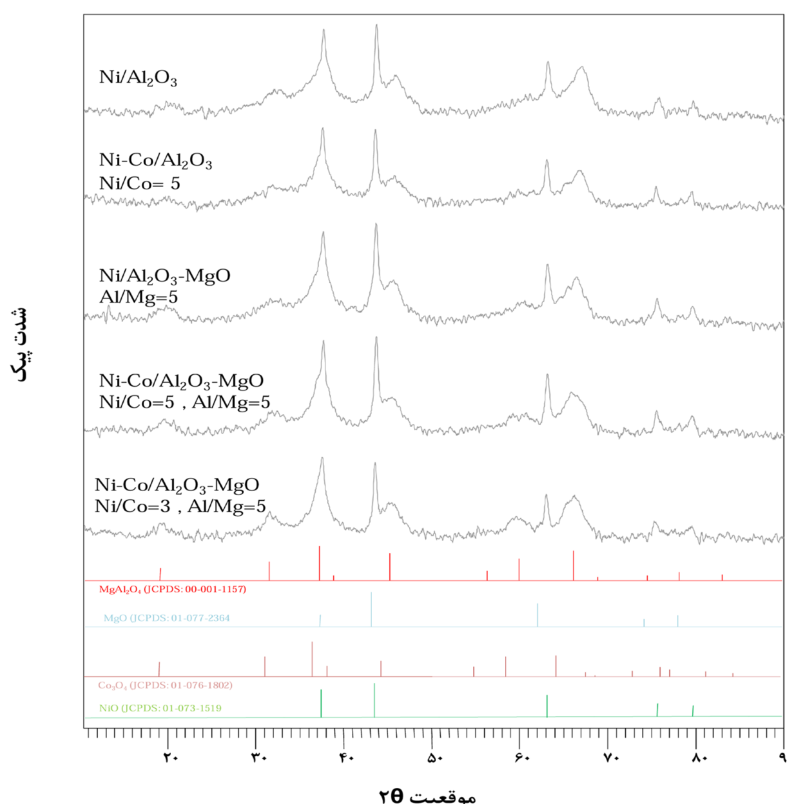
## نتایج و بحث‌ها

### تعیین مشخصات فیزیکی کاتالیست‌های سنتزی

نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس، برای نمونه‌های سنتز شده در شکل ۲ نشان داده شده است. پیک‌های شاخص طبق استاندارد JCPDS 01-073-1519، در زاویه های متناظر ۳۷/۳°، ۴۳/۴°، ۶۳/۰°، ۷۵/۶° و ۷۹/۶° تشکیل ساختار کریستالی اکسید نیکل را نشان می‌دهند. ساختار کریستالی اکسید کبالت نیز با پیک‌های مشخص شده در زوایای شاخص ۹/۰°، ۳۱/۳°، ۳۶/۹°، ۴۴/۹°، ۵۹/۵° و ۶۵/۳° طبق استاندارد JCPDS 01-076-1802 مطابقت دارد. ساختار کریستالی اسپینل $MgAl_2O_4$ طبق استاندارد JCPD 00-001-1157 در زوایای ۱۹/۲°، ۳۱/۶°، ۳۷/۳°، ۴۵/۳°، ۶۰/۰° و ۶۶/۲° مشاهده شده است. پیک‌های مشخص شده در زاویه‌های ۳۷/۰°، ۴۳/۰°، ۶۲/۴°، ۷۴/۸° و ۷۸/۷° نیز تشکیل ساختار کریستالی اکسید منیزیم را طبق استاندارد JCPDS 01-077-2364 اثبات می کنند.

از مقایسه نمودارها مشخص است که با افزودن منیزیم اکسید و کبالت به عنوان تقویت کننده به ساختار کاتالیست، بلورینگی ساختار کاتالیست بهبود پیدا می‌کند که این امر با افزایش ارتفاع پیک‌های متناظر مشخص است. تغییر ساختار فاز فعال با تغییر نسبت Ni/Co از ۳ به ۵ نشان می‌دهد که با کاهش کبالت در ساختار فاز فعال، میزان بلورینگی کاهش یافته و کاتالیست به سمت آمورف شدن بیشتر می‌رود که این امر می‌تواند موجب بالارفتن میزان پخش شوندگی فاز فعال گردد که انتظار می‌رود این امر باعث دسترسی بهتر واکنش دهنده‌ها به فاز فعال شود.

تشکیل فازاسپینل $MgAl_2O_4$ در طی فرآیند کلسیناسیون نیز می‌تواند با تغییر در ماهیت اسیدیتهٔ کاتالیست، کارایی آن را در طول فرآیند بهبود بخشد زیرا کربن دی اکسید یک گاز اسیدی است و جذب و تبدیل آن روی کاتالیستی با خاصیت قلیایی تر، بهتر صورت می‌گیرد.




**شکل ۲** آنالیز پراش اشعه ایکس برای کاتالیست‌های سنتزی $Ni/Al_2O_3$ بنیان.

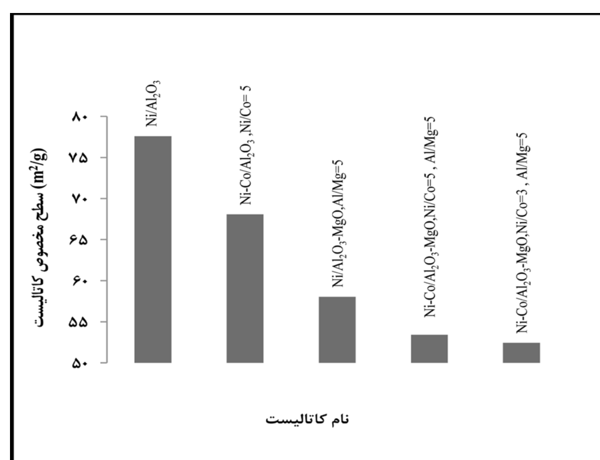
پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱ ، صفحه ۳۵-۲۷

برای تعیین سطح ویژه نمونه‌های سنتزی، آنالیز جذب و دفع نیتروژن مورد استفاده قرارگرفته است. گاما آلومینای مورد استفاده به عنوان پایه، سطح مخصوصی برابر با $116\ m^2/g$ دارد. با افزودن منیزیم اکسید به عنوان تقویت کننده به پایه، سطح مخصوص پایه به $72/6\ m^2/g$ می‌رسد. این کاهش سطح مخصوص به علت این است که ذرات منیزیم اکسید سطح آلومینا را پوشش داده و قسمتی از خلل و فرج سطحی را اشغال می‌کنند. نتیجه آنالیز تعیین سطح مخصوص برای کاتالیست‌های سنتز شده در شکل ۳ نشان داده شده است. کاتالیست $Ni/Al_2O_3$ سطح مخصوصی برابر با $77/58\ m^2/g$ دارد. افزودن کبالت و منیزیم اکسید به عنوان تقویت کننده موجب کاهش چشمگیر سطح مخصوص کاتالیست‌ها می‌شود که این امر به دلیل اشغال سطح و همچنین خلل و فرج ساختار کاتالیست می‌باشد. همچنین، با تغییر نسبت Ni/Co از ۵ به ۳ سطح مخصوص به میزان محسوسی کاهش می‌یابد که مطابق انتظار، به دلیل پوشانده شدن سطح نمونه‌ها با Co می‌باشد.

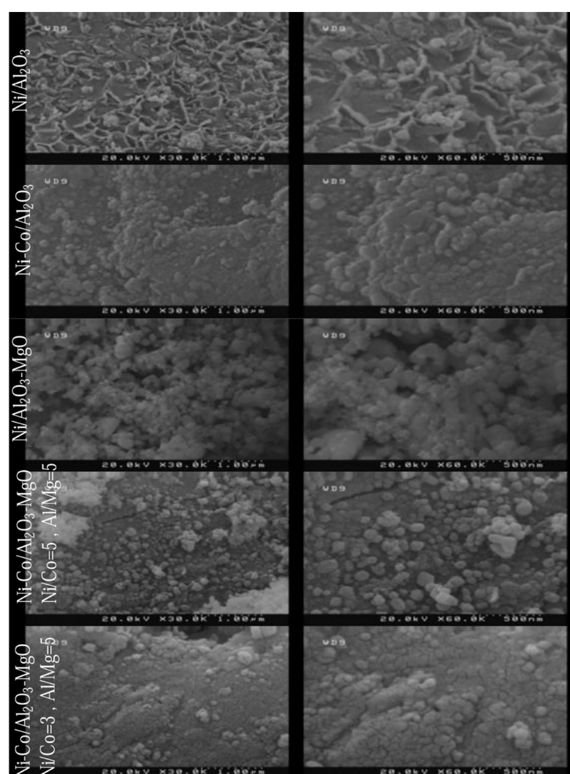
نتایج تصویربرداری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای نمونه‌های سنتزی در شکل ۴ نشان داده شده است. در تصویرمربوط به کاتالیست $Ni\text{-}Co/Al_2O_3$ با نسبت Ni/Co برابر با ۵، تاثیر افزودن کبالت به عنوان تقویت‌کننده فاز فعال مشهود است. واضح است که افزودن کبالت، باعث شده تا یک بی‌نظمی در نوع چینش ذرات سطح بوجود آید و ساختار سطح کاتالیست تحت تأثیر قرار گیرد.

با مقایسه تصاویر مربوط به کاتالیست $Ni/Al_2O_3$ و کاتالیست $Ni\text{-}Co/Al_2O_3$ با نسبت Al/Mg برابر با ۵ مشاهده می‌شود که افزودن منیزیم اکسید به ساختار پایه، باعث شده است که از حجم خلل و فرج سطح کاسته شود که این امر به دلیل اشغال قسمتی از سطح آلومینا توسط منیزیم اکسید می‌باشد.

اثر استفاده از تقویت‌کننده فاز فعال و پایه به صورت همزمان در ساختار کاتالیست‌ها، در تصاویر مربوط به کاتالیست $Ni\text{-}Co/Al_2O_3\text{-}MgO$ با نسبت Ni/Co و Al/Mg برابر با ۵ و کاتالیست $Ni\text{-}Co/Al_2O_3\text{-}MgO$ با نسبت Ni/Co برابر با ۳ و Al/Mg برابر با ۵ قابل مشاهده است. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد افزودن منیزیم اکسید به پایه کاتالیست باعث کم شدن سطح حفره‌ها به دلیل اشغال آنها توسط ذرات منیزیم می‌گردد. از طرفی مشاهده می‌شود که با افزودن کبالت اکسید به ساختار کاتالیست، ساختار سطح تغییر کرده و نوع چینش فلز در سطح متفاوت می‌باشد. افزایش نسبت کبالت به نیکل در ساختارکاتالیست موجب می‌شود که اندازه ی ذرات درسطح کاتالیست درشت‌تر گردد و یکنواختی توزیع اندازه ذرات، به هم بخورد.




**شکل ۳** اندازه‌گیری سطح مخصوص کاتالیست‌های سنتزی $Ni/Al_2O_3$ بنیان.

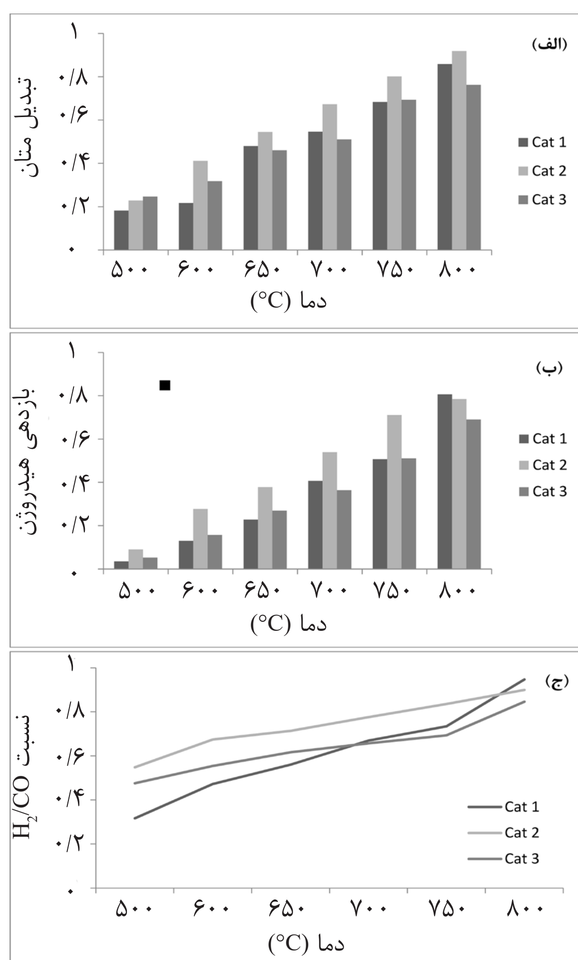



**شکل ۴** آنالیز FESEM کاتالیست‌های سنتزی $Ni/Al_2O_3$ بنیان.

### تست‌های ارزیابی عملکرد کاتالیست‌های سنتزی

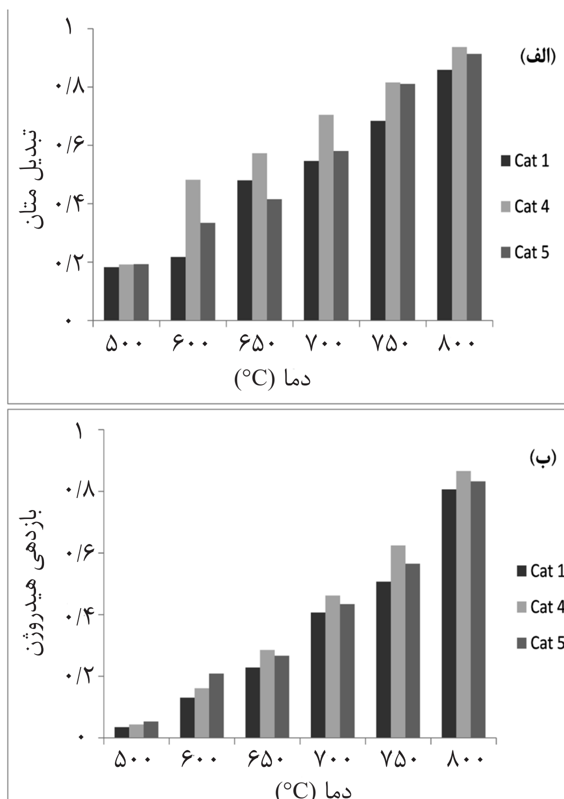
همان‌طور که قبلاً اشاره شده است، آزمایش‌های ارزیابی فعالیت کاتالیست‌ها در بازه دمایی ۸۰۰°C-۵۰۰ و با نسبت خوراک $CH_4/CO_2$= ۱ و سرعت فضایی گاز برابر با ۲۴ L/g.h انجام شده است. تأثیر تقویت کننده‌ها روی عملکرد کاتالیست $Ni/Al_2O_3$ در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزودن اکسید منیزیم به ساختار کاتالیست باعث شده است تا از فعالیت کاتالیست کم شود، که این مورد به دلیل کاهش سطح ویژۀ کاتالیست در اثر افزودن اکسید منیزیم می‌باشد. همچنین کاهش حجم حفره‌های سطح کاتالیست سنتزی نیز، این موضوع را تأیید می‌نماید. از سوی دیگر، افزودن کبالت به عنوان تقویت کننده فعال، باعث بهبود فعالیت کاتالیست می‌شود. با مقایسه عملکرد کاتالیست $Ni/Al_2O_3$ و کاتالیست $Ni\text{-}Co/Al_2O_3$ با نسبت Al/Mg برابر با ۵ مشاهده شده است که افزودن تقویت کننده به پایه کاتالیست در دماهای پایین، موجب بهبود عملکرد آن می‌شود.

همچنین مشاهده می‌شود که نسبت $H_2/CO$ با افزایش دما افزایش می‌یابد که به علت گرما گیر بودن فرآیند می‌باشد و علت این که در دماهای بالاتر، فعالیت کاتالیست ها مشابه هم می‌شوند به علت نزدیک شدن به حالت تعادل است.



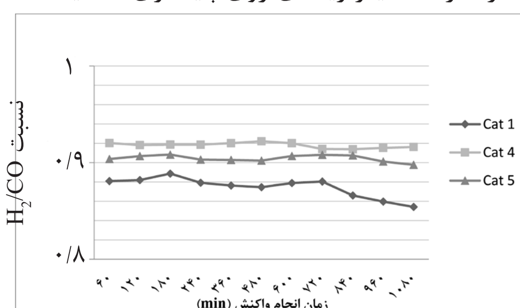

**شکل ۵** ارزیابی عملکرد کاتالیست‌های سنتزی $Ni\text{-}Co/Al_2O_3$ (Cat 2)، $Ni/Al_2O_3$ (Cat 1) و $Ni/Al_2O_3\text{-}MgO$ (Cat 3)
الف: تبدیل متان، ب: بازدهی هیدروژن، ج: نسبت $H_2/CO$.

در شکل ۶ نتایج بررسی تاثیر استفاده همزمان از تقویت‌های فاز فعال و پایه نشان داده شده است. با توجه به ترمودینامیک واکنش و گرماگیر بودن آن، با افزایش دما میزان درصد تبدیل افزایش می‌یابد و در دمای ۸۰۰ °C، به دلیل نزدیک شدن به تعادل، کاتالیست‌ها رفتار مشابهی از هم نشان می‌دهند. کاتالیست $Ni\text{-}Co/Al_2O_3\text{-}MgO$ با نسبت Ni/Co =۵ فعالیت بالاتری نسبت به کاتالیست سنتزی با نسبت Ni/Co =۳ از خود نشان می‌دهد که میتواند به دلیل مورفولوژی خاص سطح باشد.




**شکل ۶** ارزیابی عملکرد کاتالیست های سنتزی (Cat 1) $Ni/Al_2O_3$ و (Cat 4) $Ni\text{-}Co/Al_2O_3\text{-}MgO$ با ترکیب درصد ۵= Ni/Co و کاتالیست (Cat 5) $Ni\text{-}Co/Al_2O_3\text{-}MgO$ با ترکیب درصد ۵= Ni/Co و۳= Ni/Co
الف: تبدیل متان، ب: بازدهی هیدروژن

نتیجه آزمایش پایداری برای کاتالیست‌های سنتزی نیز در شکل ۷ نمایش داده شده است.واضح است که بعد از ۱۰۸۰ min انجام واکنش، که کاتالیست‌های تقویت شده فعالیت پایدارتری از خود نشان داده‌اند. علاوه بر تأثیر منیزیم اکسید روی مقاومت حرارتی کاتالیست، اصلاح مورفولوژی سطح کاتالیست به دلیل حضور کبالت و گسترده شدن تابع توزیع اندازه ذرات تاثیر زیادی روی پایداری کاتالیست دارد.



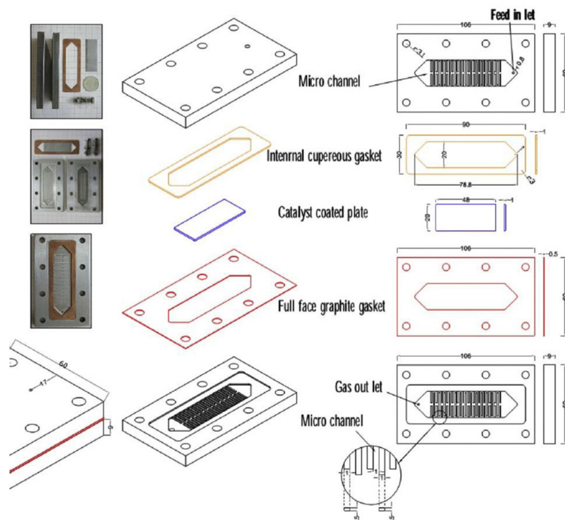

**شکل ۷** تست پایداری کاتالیست‌های سنتزی (Cat 1) $Ni/Al_2O_3$ و (Cat 4) $Ni\text{-}Co/Al_2O_3\text{-}MgO$ با ترکیب درصد ۵= Ni/Co و ۵= Ni/Co و کاتالیست (Cat 5) $Ni\text{-}Co/Al_2O_3\text{-}MgO$ با ترکیب درصد ۵= Ni/Co و ۳= Ni/Co.

## نتیجه‌گیری

کاتالیست Ni/Co فعالیت قابل قبولی در فرآیند ریفرمینگ خشک متان از خود نشان می‌دهد، اما غیرفعال شدن در طول فرآیند، یکی از چالش‌های آن می باشد. استفاده از کبالت به عنوان تقویت کننده فاز فعال و همچنین استفاده از اکسید منیزیم برای تقویت فاز فعال، باعث بهبود فعالیت و پایدار شدن آن می‌گردد. همچنین استفاده همزمان از تقویت کننده‌های فاز فعال و پایه، عملکرد کالیست سنتزی $Ni\text{-}Co/Al_2O_3\text{-}MgO$ به طور چشمگیری بهبود پیدا می‌کند. که این امر را می توان به دلیل تاثیر کبالت در اصلاح ساختار سطح و تاثیر اکسید منیزیم در مقاومت حرارتی کاتالیست دانست.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم میدانند از دانشگاه رازی کرمانشاه به دلیل حمایت های مالی و در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی صمیمانه تشکر و قدردانی نمایند.




**شکل** پیوست الف نمای کلی میکروراکتور مورد استفاده [۲۱].

## مراجع

[1]. Bhattar S, Abedin M A, Kanitkar S, Spivey J J (2020) A review on dry reforming of methane over perovskite derived catalysts, Catalysis Today, 365, 2-23.
[2]. Jurković D L, Liu J L, Pohar A, Likozar B (2021) Methane dry reforming over Ni/$Al_2O_3$ catalyst in spark plasma reactor: linking computational fluid dynamics (CFD) with reaction kinetic modelling, Catalysis Today 36: 11-21.
[3]. Shi X, Zhang X, Wang F, Yang L, Dong Y, Shuai Y (2021) Thermochemical analysis of dry methane reforming hydrogen production in biomimetic venous ierarchical porous structure solar reactor for improving energy storage, International Journal Of Hydrogen Energy, 46: 7733-7744.
[4]. Carapellucci R, Giordano L (2020) Steam, dry and auto thermal methane re forming for hydrogen production: A thermodynamic equilibrium analysis, Journal of Power Sources, 469: 228-391.
[5]. Ma Q, Guo L, Fang Y, Li H, Zhang J, Zhao T S, Tsubaki N (2019) Combined methane dry reforming and methane partial oxidization forsyngas production over high dispersion Ni based mesoporous catalyst, Fuel Processing Technology, 188: 98–104.
[6]. Pérez J M M, Carlos J Lucio-Ortiz, Javier R de la R, Carolina S M, David A. De H Del Río, Ladislao Sandoval-Rangel, M. A. Garza-Navarro, Daniela X. M-V, and Francisco J M-L (2021) Dry reforming of methane for hydrogen production using bimetallic catalysts of pt-fe supported on γ-alumina, The Journal of Chemistry Select, 45: 12685-12695.
[7]. Wei Q, Yang G, Gao X, Yamane N, Zhang P, Liu G, Tsubaki N (2017) Ni/Silicalite-1 coating being coated on SiC foam: A tailor-made monolith catalyst for syngas production using a combined methane reforming process, Chemical Engineering Journal, 327: 465–473.
[8]. Dou J, Zhang R, Hao X, Bao Z, Wu T, Wang B, Yu F (2019) Sandwiched $SiO_2$@Ni@$ZrO_2$ as a coke resistant nanocatalyst for dryreforming of methane, Applied Catalysis B: Environmental, 254: 612–623.
[9]. Li L, Chen J, Zhang Q, Yang Z, Sun Y, Zou G (2020) Methane dry reforming over activated carbon supported Ni-catalysts prepared by solid phase synthesis, Journal of Cleaner Production, 274: 122-126.
[10]. Bawornruttanaboonya K, Devahastin S, Mujumdar A S, Laosiripojana N (2018) Comparative evaluation of auto thermal reforming of biogas into synthesis gas over bimetallic Ni-Re/$Al_2O_3$ catalyst in fixed-bed and coated-wall micro reactors: A computational study, International journal of hydrogen energy, 43: 13237-13255.
[11]. Yahyavi S R, Haghighi M, Shafiei S, Abdollahifar M, Rahmani F (2015) Ultrasound-assisted synthesis and physicochemical characterization of Ni–Co/Al2O3–MgONano catalysts enhanced by different amounts of MgO used for $CH_4$/$CO_2$ reforming, Energy Conversion and Management, 97: 273–281.
[12]. Abdollahifar M, Haghighi M, Sharifi M (2015) Dry reforming of methane over nanostructured Co/Y catalyst for hydrogen production: Effect of ultrasound irradiation and Co-loading on catalyst properties and performance, Energy Conversion and Management, 103: 1101–1112.
[13]. Estephane J, Aouad S, Hany S, El Khoury B, Gennequin C, El Zakhem H, Abi Aad E (2015) $CO_2$ reforming of methane over Ni-Co/ZSM5 catalysts, Aging and carbon deposition study, International Journal of Hydrogen Energy, 40: 9201-9208.
[14]. Jurković D L, Liu J L, Pohar A, Likozar B (2020) Methane dry reforming over Ni/$Al_2O_3$ catalyst in spark plasma reactor: linking computational fluid dynamics (CFD) with reaction kinetic modelling, Catalysis Today, 362, 11-21.
[15]. Horváth A, Németh M, Beck A, Maróti B, Sáfrán G, Pantaleo G, La Parola V (2021) Strong impact of indium promoter on Ni/$Al_2$O3 and Ni/$CeO_2$-$Al_2O_3$ catalysts used in dry reforming of methane, Applied Catalysis A, General, 621: 118-124.
[16]. Neuberg S, Pennemann H, Shanmugam V, Zapf R, Kolb G (2021) Promoting effect of Rh on the activity and stability of Pt-based methanecombustion catalyst in micro reactors, Catalysis Communications, 149: 106-112.
[17]. Xie T, Zheng H Y, Xu K D, Zhang Z Y, Yang B L, Yu B (2021) High performance Ni-based porous catalytically activated absorbers andestablishment of kinetic model for complex solar methane dry reformingreaction system, Chemical Engineering Science, 239: 116-125.
[18]. Wang F, Wang Y, Zhang L, Zhu J, Han B, Fan W, Shi W (2021) Performance enhancement of methane dry reforming reaction for syngas production over Ir/Ce0.9La0.1O2-nanorods catalysts, Catalysis Today, 355: 502-511.
[19]. Chen J, Yan L, Song W, Xu D (2017) Methane steam reforming thermally coupled withcatalytic combustion in catalytic microreactors forhydrogen production, International Journal of Hydrogen Energy 45: 1-17.
[20]. Sangsong S, Phongaksorn M, Tungkamani S, Sornchamni T, Chuvaree R (2015) Dry methane reforming performance of Ni-based catalyst coated onto stainless steel substrate, Energy Procedia, 79: 137 – 142.
Rezaei R, Moradi G (2018) Study of the performance of dry methane reforming in a microchannel reactor usingsputtered Ni/$Al_2O_3$ coating on stainless steel, International Journal of Hydrogen Energy, 52: 1-12.

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۵۹-۳۶

# بررسی رخساره‌ها، فرآیندهای دیاژنز و محیط رسوبی سازند شوریجه در میدان گازی خانگیران

زهرا مشایخی[1]، علی کدخدایی*[2]، علی سلگی[1]، سید احمد بابازاده[3] و سید محسن آل علی[1]

۱- گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوری‌های همگرا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم وتحقیقات، تهران، ایران.

۲- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران.

۳- گروه علوم زمین، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱

**چکیده**

سازند شوریجه در حوضه رسوبی کپه داغ نهشته شده و یکی از سنگ‌های مخزن گازی در شمال خاور ایران است. میدان گازی خانگیران با یک ساختار شمال غربی جنوب شرقی در بخش شمال شرقی استان خراسان رضوی واقع شده است. هدف از این مطالعه بررسی رخساره‌ها، محیط رسوبی و فرآیندهای دیاژنتیکی است که بر کیفیت مخزنی سازند شوریجه در چاه‌های مورد مطالعه موثر بوده‌اند. بررسی پتروگرافی ۴۸۰ عدد مقطع نازک سازند شوریجه در چاه‌های مورد مطالعه منجر به شناسایی ۹ رخساره رسوبی شامل کنگلومرای ماسه‌ای، کوارتز آرنایت، ساب لیتارنایت، ساب آرکوز، کوارتز وک، رس‌سنگ/ شیل، انیدریت نودولار، دولومادستون ماسه‌ای و دولوگرینستون ماسه‌ای متعلق به پهنه‌های جزر و مدی، رودخانه‌ای، دشت سیلابی و رسوبی مئاندری شده است. مطالعات پتروگرافی مقاطع نازک میکروسکوپی نشان می‌دهد که فرآیندهای دیاژنزی در سه محیط دریایی، جوی و تدفینی، سازند شوریجه را تحت تأثیر قرار داده‌اند. از فرآیندهای دیاژنتیکی اثر گذار در رخساره‌های سازند شوریجه می‌توان به سیمانی‌شدن، آشفتگی زیستی، دولومیتی‌شدن اولیه، انیدریتی شدن، تخلخل، شکستگی، تراکم و انحلال اشاره کرد. در نهایت با استفاده از نمودار تصویرگر، نمودار پتروفیزیکی و تلفیق نتایج حاصل از مطالعات مقاطع نازک در چاه کلیدی چاه‌های مورد مطالعه میدان خانگیران مشخص گردید که در اکثر موارد انطباق خوبی بین نتایج حاصل از نمودار تصویرگر، مقاطع نازک و نمودار پتروفیزیکی وجود دارد.

**کلمات کلیدی: میدان گازی خانگیران، رخساره‌ها، فرآیندهای دیاژنز، محیط رسوبی، نمودار پتروفیزیکی و نمودار تصویرگر**

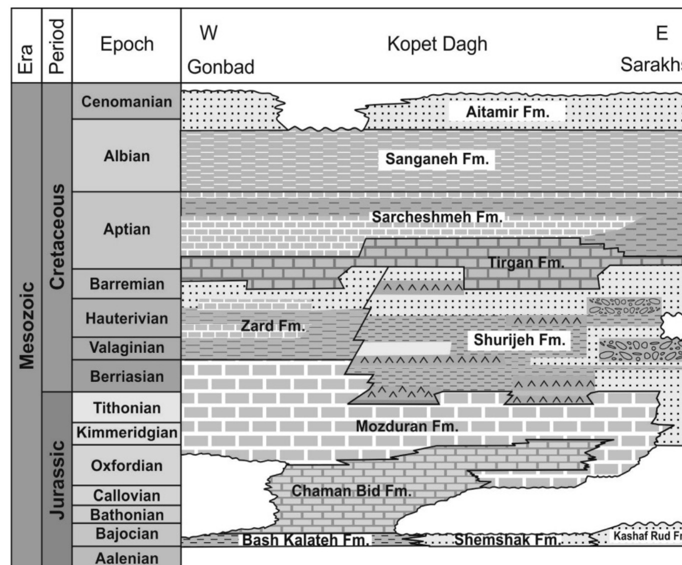
## مقدمه

پهنه رسوبی ساختاری کپه داغ در شمال خاور ایران واقع شده است. این پهنه بخش‌هایی از ترکمنستان و شمال افغانستان را نیز در بر می‌گیرد [۱]. سازند شوریجه به سن کرتاسه پیشین (نئوکومین-بارمین) متشکل از رخساره‌های غالب آواری سرخ رنگ و کربناتی است که در حوضه کپه داغ گسترش دارد (شکل ۱).

*مسؤول مکاتبات

آدرس الکترونیکی kadkhodaie_ali@tabrizu.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4650.3090)

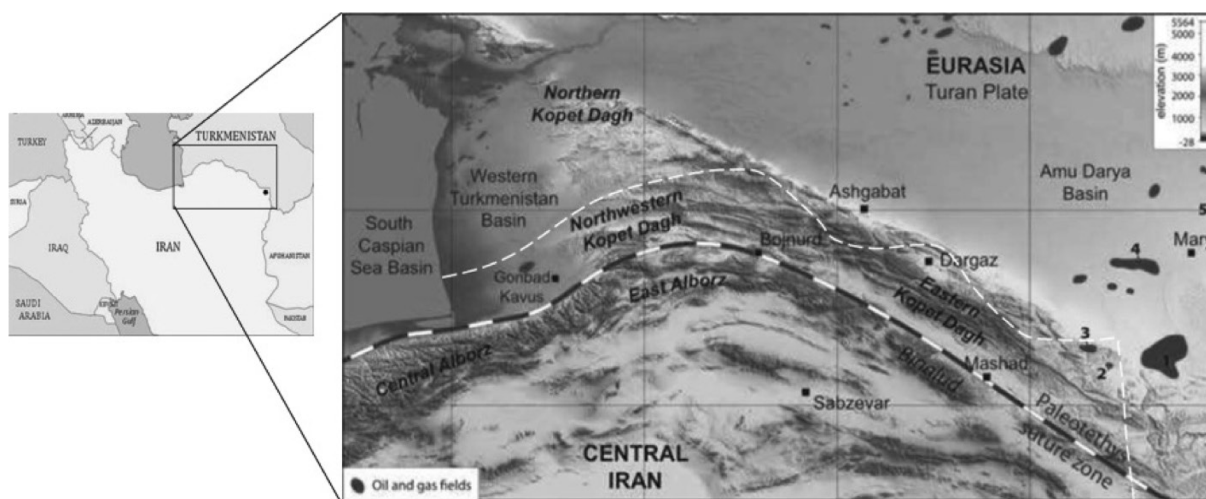



**شکل ۱** ستون چینه‌شناسی ژوراسیک پسین-کرتاسه پیشین در حوضه کپه داغ [۴]

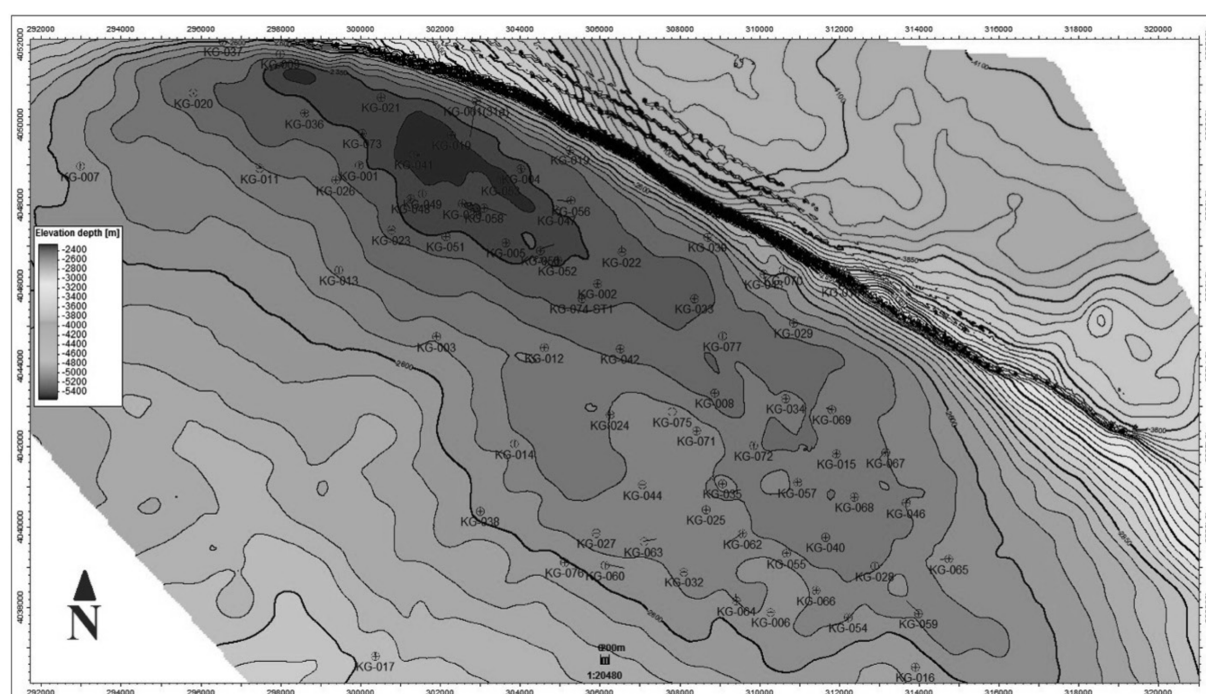
توالی‌های ماسه‌ای این سازند در ایران، بخش مخزنی میادین گازی ناحیه سرخس (خانگیران و گنبدلی) را تشکیل می‌دهد و معادل آن (سازندهای کارابیل[1]، الموراد[2] و شاتلیک[3]) سنگ مخزن مهم گاز در ترکمنستان (بویژه در میادین دولت آباد و بایراملی) هستند [۲]. میدان گازی خانگیران یکی از میادین مهم واقع در شمال شرق ایران در حوضه کپه داغ است (شکل ۲). این میدان با ساختار شمال غربی- جنوب شرقی در بخش شمال شرقی استان خراسان رضوی، در نزدیکی مرز جغرافیایی با کشور ترکمنستان، در ۲۵ km شمال‌غربی سرخس و ۱۸۰ km شمال‌شرقی مشهد قرار دارد [۴]. ضخامت سازند شوریجه در میدان گازی خانگیران از شمال غرب به جنوب شرق روند کاهشی را نشان می‌دهد (شکل ۳). این تغییر ضخامت بیشتر مربوط به زون‌های A و C است و به‌طور مساوی بین آنها تقسیم شده است. ضخامت زون‌های D و B در این روند تقریباً ثابت است. زون A در سازند شوریجه که پوشاننده سازند مزدوران است تغییر ضخامت قابل توجهی در کل میدان ندارد. زون B یک روند افزایشی به‌طرف چاه‌های غربی و جنوب غربی میدان را نشان می‌دهد. میزان تخلخل در زون B سازند شوریجه از غرب به شرق کاهش پیدا می‌کند. ضخامت زون C به‌طرف چاه‌های شمال غربی میدان افزایش می‌یابد. ضخامت زون D از چاه‌های جنوب شرقی میدان به‌سمت چاه‌های شمال غربی کاهش می‌یابد. میزان تخلخل در زون‌های D1 و D2 سازند شوریجه از غرب به شرق افزایش پیدا می‌کند. زون E نیز تغییرات قابل توجهی در کل میدان ندارد [۴].

سازند شوریجه برای اولین بار توسط افشارحرب و انصاری در روستای شوریجه در شرق شهر مشهد تعریف شد و برش دره خور با ضخامت ۹۸۰ m در مسیر مشهد-کلات نادری به‌عنوان برش الگو تعریف شد [۵]. رضا ندافکهنه قوچان و همکاران به بررسی مطالعات لیتواستراتیگرافی و پتروگرافی سازند شوریجه در منطقه مورد مطالعه پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد سازند شوریجه محیط مردابی– دریایی در این منطقه داشته و رخساره‌های مقطع چشمه گیلاس بیانگر محیطی قاره‌ای- مردابی است، در مقطع دره خور، سازند تحت تأثیر وضعیتی قاره‌ای- مردابی بوده و بالاخره رسوبات سازند شوریجه در گردنه مزدوران در یک محیط رودخانه‌ای تشکیل شده‌اند [۶].

1. Karabil Fm
2. Almurad Fm
3. Shatlyk Fm




**شـــکل ۲** محـل میـدان خانگیـران در شـمال شـرق ایـران و محـل میدان‌هـای گاز، میادیـن اصلـی گاز شـامل: ۱- دولـت آبـاد، ۲- گنبدلـی، ۳- خانگیـران، ۴- شـاتلیک؛ ۵- بایـرام علـی، خـط سـفید: مـرز کشـورها [۳]




**شکل ۳** محل حفاری چاه‌های میدان خانگیران روی خطوط همتراز زیر سطحی سازند شوریجه

پریسا طباطبایی و همکارانش به بررسی رخساره‌ها و محیط رسوبی سازند شوریجه، خاور حوضه رسوبی کپه داغ پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها منجر به شناسایی رخساره‌های سیلیسی آواری و تبخیری سازند شوریجه در برش‌های مورد مطالعه شده است. این رخساره‌ها در محیط رسوبی رودخانه‌های بریده بریده، مئاندری و دریاچه‌ای نهشته شده‌اند [۷].

مریم مرتضوی مهریزی و همکاران به بررسی محیط رسوبی و دیاژنز سازند شوریجه در منطقه مورد نظر پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها منجر به تشخیص دو مجموعه رخساره آواری و رخساره کربناته مرتبط با دشت ساحلی گردید. رخساره‌های مذکور در محیط رسوبی قاره‌ای- حدواسط (دشت ساحلی) نهشته شده‌اند.

همچنین، بررسی‌های پتروگرافی صورت گرفته توسط آن‌ها نشان داد که فرآیندهای دیاژنتیکی این سنگ‌ها در سه رژیم ائوژنیک[1]، مزوژنیک[2] و تلوژنیک[3] ساخته شده است. این فرآیندها در سنگ‌های سیلیسی آواری شامل فشردگی فیزیکی و شیمیایی، سیمانی‌شدن، هماتیتی شدن، دگرسانی، انحلال و جانشینی فلدسپات، ایجاد شکستگی و پرشدگی رگه است. در سنگ‌های آهکی مورد مطالعه فرآیندهای دیاژنتیکی شامل فشردگی فیزیکی و شیمیایی، میکریتی شدن، آشفتگی‌زیستی[4]، سیمانی‌شدن کلسیتی، دولومیتی‌شدن، نئومورفیسم، پیدایش شکستگی و پرشدگی رگه است [۸]. مریم منصوری هفشجانی و همکاران به کاربرد نمودارهای تصویرگر در شناسایی ویژگی‌های رخساره‌های رسوبی و پدیده‌های دیاژنزی پرداختند و نتیجه گرفتند نمودارهای تصویرگر در موارد بسیاری با نمونه های مغزه و مقاطع نازک مطابقت داشتند [۹]. هدف از این مطالعه تشخیص و تفکیک رخساره‌ها، محیط رسوبی، ارائه مدل رسوبی و همچنین مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنتیکی است که بر کیفیت مخزنی سازند شوریجه در چاه‌های مورد مطالعه مؤثر بوده‌اند. آگاهی دقیق از این پارامترها به متخصصین این امکان را می‌دهد که برای بررسی دقیق مراحل تولید در یک میدان اطلاعات کافی در اختیار داشته باشند و با آگاهی از آن‌ها توانایی بیشتری در توسعه میادین نفتی خواهند داشت.

## روش مطالعه

در این مطالعه جهت دستیابی به اهداف تحقیق، تعداد ۴۸۰ عدد مقطع نازک میکروسکوپی از ۵ چاه مورد مطالعه سازند شوریجه تحت بررسی‌های پتروگرافی قرار گرفت. این مقاطع به‌طور عمده (بیش از ۸۰٪) از خرده‌های حفاری بوده و فواصل نمونه‌برداری از ۳۰ cm تا ۱/۵ m متغیر است. نام‌گذاری رخساره‌های آواری براساس طبقه‌بندی فولک و پتی جان و صورت گرفته و شرایط محیطی آن‌ها براساس طبقه‌بندی مایال تفسیر شده است. همچنین، انواع فرآیندهای دیاژنزی در سازند شوریجه شناسایی شده و تأثیر آن‌ها برروی کیفیت مخزنی مورد بحث قرار گرفته است. برای بررسی خصوصیات پتروفیزیکی و نمودارهای تصویرگر جهت انطباق با نتایج حاصل از مقاطع نازک از نرم‌افزار ژئولاگ[5] استفاده شده است.

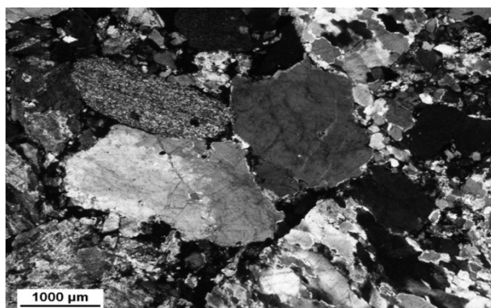
## بررسی رخساره‌ها در سازند شوریجه

براساس مطالعات میکروسکوپی انجام شده برروی مقاطع نازک توالی سازند شوریجه در چاه‌های مورد مطالعه، ۹ رخساره سنگی اصلی شامل کنگلومرای ماسه‌ای، کوارتز آرنایت، ساب لیتارنایت، ساب آرکوز، کوارتز وک، رس‌سنگ/ شیل، انیدریت نودولار، دولومادستون ماسه‌ای و دولوگرینستون ماسه‌ای شناسایی گردیده است.

### میکروکنگلومرا

این پتروفاسیس در بخش قاعده زون B توالی سازند شوریجه قابل مشاهده است که متشکل از ذرات دانه درشت چرت و کوارتز پلی کریستالین نیمه گرد شده دارای پوشش هماتیتی است (شکل ۴). اجزای دیگر در این رخساره شامل خرده‌های ماسه‌سنگی، کربناته و گاهی سنگ‌های دگرگونی درجه پایین هستند. جورشدگی قطعات ضعیف تا متوسط است. مهم‌ترین سیمان‌های مشاهده شده در این رخساره سیمان سیلیسی، کلسیتی و دولومیتی آغشته به اکسید آهن همراه با سیمان انیدریتی هستند. این رخساره به‌صورت تناوبی از کنگلومرا تا کنگلومرای ماسه‌ای و ماسه سنگ درشت دانه گراولی در زون B در چاه‌های مختلف مشاهده شده است. که در بخش بالایی این افق به ماسه متوسط تا زیر دانه، شیل رسی و سیلتی انیدریت‌دار تبدیل می‌گردد.

1. Eogenic
2. Mesogenic
3. Telogenic
4. Bioturbation
5. Geolog




**شکل ۴** میکروکنگلومرا

این پتروفاسیس به‌سمت چاه‌های بخش شمال غربی میدان به‌صورت ماسه گراولی تغییر رخساره می‌دهد. این پتروفاسیس به‌صورت نهشته‌های برجای مانده[1] پیش‌رونده در بخش پایینی زون B در چاه‌های مختلف مشاهده شده و از نظر محیط تشکیل، به بخش پرانرژی رودخانه‌های بریده بریده شامل پشته‌های طولی[2] و رسوبات غربال شده[3] حاصل از مهاجرت جانبی کانال‌ها نسبت داده می‌شود [۱۰].

**کوارتزآرنایت**

اجزای اصلی تشکیل‌دهنده این پتروفاسیس، به‌طور عمده از ذرات دانه ریز تا متوسط کوارتز، با جورشدگی متوسط تا خوب و نیمه زاویه‌دار تشکیل شده است (شکل ۵). سایر اجزای فرعی شامل چرت، گلاکونیت، مسکوویت و کانی‌های سنگین هستند. ماتریکس نیز در این پتروفاسیس وجود نداشته یا در تعدادی از نمونه‌ای ۲ تا ۳٪ است. مهم‌ترین سیمان‌های موجود در این پتروفاسیس شامل سیمان سیلیسی (به‌صورت رشد اضافه در اطراف ذرات و سیمان بین دانه‌ای)، سیمان کلسیتی (به شکل بین دانه‌ای و پویکیلوتوپیک[4]) و گاهی سیمان دولومیتی پرکننده فضاهای خالی است. ذرات کوارتز در برخی موارد تا حد زیادی فشرده شده و دارای مرزهای مضرس هستند [۲]. این پتروفاسیس به‌طور عمده در زون D و به‌صورت میان لایه‌های نازکی در بخش‌هایی از زون‌های B و C نیز مشاهده شده است.

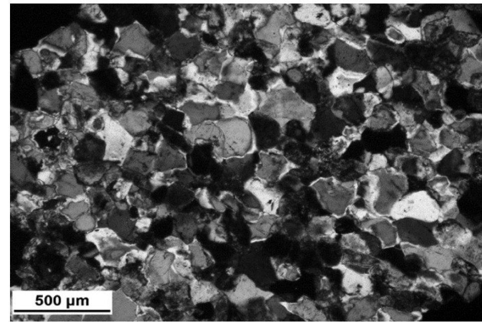
**ساب لیتارنایت**

ذرات تشکیل‌دهنده در ساب لیتارنایت‌ها شامل دانه‌های چرت کوارتز چند بلوری، کوارتز دارای خاموشی موجی، فلدسپات‌های تجزیه شده، خرده سنگ‌های کربناته و فلدسپار (کلسیم‌دار) هستند (شکل ۶). میزان ذرات کوارتز در این پتروفاسیس ۵۰ تا ۶۰٪ است. ذرات لیتارنایت‌ها به‌طور معمول فشرده بوده و دارای سطوح تماسی محدب مقعر و گاهی اوقات مضرس هستند. این پتروفاسیس به‌طور عمده در زون‌های B و D و به‌صورت میان لایه‌های نازکی در بخش‌هایی از زون C نیز مشاهده شده است. ساب لیتارنایت‌ها بیانگر حمل و نقل اندک و نرخ بالای رسوب‌گذاری هستند [۱۱].

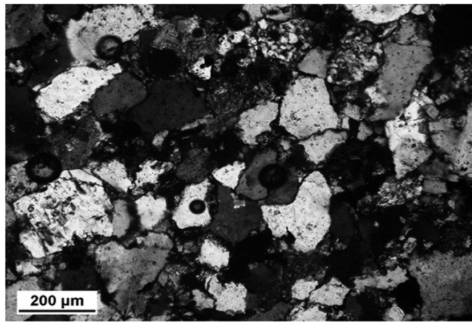
**ساب آرکوز**

در تعداد اندکی از نمونه‌ها پتروفاسیس ساب آرکوز که اندازه ذرات آن در حد ماسه ریز تا ماسه متوسط است، مشاهده شده است. این پتروفاسیس‌ها به‌طور معمول زاویه‌دار بوده و جورشدگی خوبی دارند. اجزای اصلی سازنده این پتروفاسیس شامل کوارتز (با رشد اضافی هم محور)، فلدسپار (۱۰ تا ۱۵٪) و به‌میزان کمتر کانی‌های سنگین (۲ تا ۳٪) هستند (شکل ۷). این پتروفاسیس دارای مقادیر زیادی اکسید آهن در زمینه بوده و از نظر بلوغ بافتی و کانی‌شناسی، این پتروفاسیس در حد نابالغ تا نیمه‌بالغ است. این پتروفاسیس در زون‌های B و D مشاهده شده است.

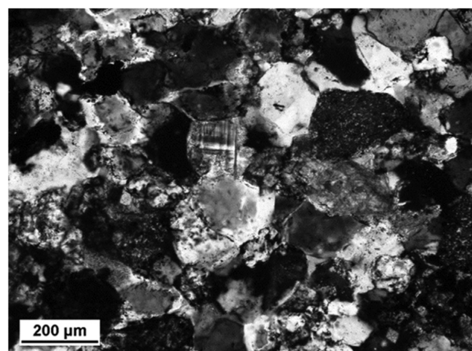
1. Lag Deposit
2. Longitudinal Bars
3. Sieve Deposits
4. Poikilotopic




**شکل ۵** کوارتز آرنایت به‌همراه سیمان‌های بین دانه‌ای کربناته و رو رشدی سیلیس




**شکل ۶** ساب لیتارنایت




**شکل ۷** ساب آرکوز

**کوارتزوک**

پتروفاسیس ماسه‌ای کوارتز وک به‌طور عمده از ذرات کوارتز (۴۰ تا ۶۰٪) تک بلور با خاموشی مستقیم در زمینه بسیار دانه ریز از رس هماتیتی که گاهی کمی آهکی هستند، تشکیل شده است. ذرات کوارتز دارای جورشدگی ضعیف و زاویه‌دار هستند (شکل ۸). میزان ماتریکس در این پتروفاسیس از ۱۵ تا ۴۵٪ متغیر است که در برخی از نمونه‌ها با آشفتگی زیستی همراه است. این پتروفاسیس به‌طور عمده در زون D همراه با رخساره‌های شیلی مشاهده شده است.

**رس سنگ/ شیل**

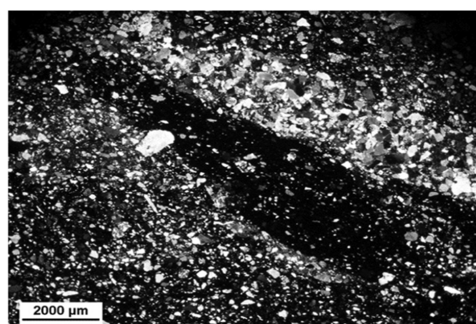
این پتروفاسیس در توالی سازند شوریجه در چاه‌های مورد مطالعه به‌صورت رس‌سنگ قرمز رنگ و هماتیتی وجود دارد (شکل ۹). بخش عمده رس‌سنگ قرمز رنگ از ذرات رس، مقداری سیلت و ماسه ریز تشکیل شده و دارای بافت توده‌ای و گاهی لامیناسیون ضعیف و آثار آشفتگی زیستی است.

ذرات کوارتز در اندازه سیلت تا ماسه ریز دانه به فرم زاویه‌دار تا نیمه زاویه‌دار در اکثر مقاطع قابل مشاهده هستند. در برخی مقاطع ذرات زاویه‌دار تا نیمه زاویه‌دار کوارتز در اندازه سیلت مشاهده شده است. در برخی دیگر به‌علت فراوانی کانی‌های ورقه‌ای، این پتروفاسیس به شیل‌های ماسه‌ای ـ سیلتی تغییر رخساره داده است. رس سنگ قرمز به‌طور عمده در زون‌های E و A و همچنین به‌صورت متناوب با پتروفاسیس ماسه‌سنگ در زون‌های D و C سازند شوریجه مشاهده می‌شود.

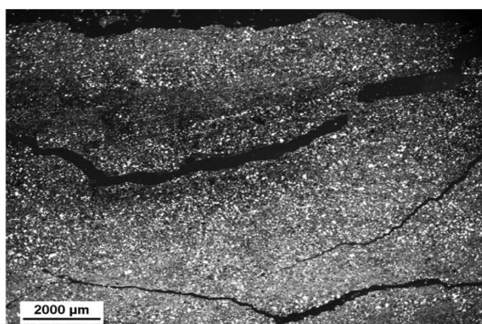
**انیدریت نودولار**

این رخساره به‌صورت ترکیبی از بلورهای درشت و رشته‌ای انیدریت قابل مشاهده است (شکل ۱۰). در مواردی نیز آثاری از بلورهای ریز دولومیت در زمینه وجود دارد. این رخساره به‌طور عمده به‌صورت نودول انیدریتی وجود دارد. در برخی موارد این رخساره دارای ساخت توده‌ای است و گاهی با پیریت همراهی دارد.

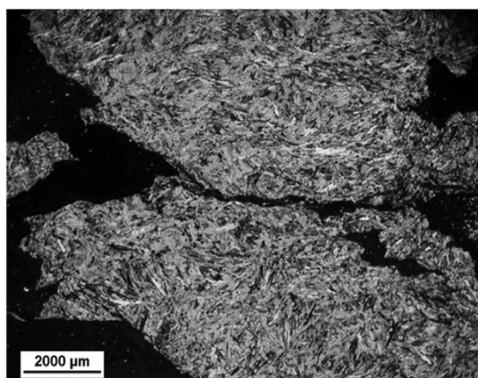
پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۵۹-۳۶




**شکل ۸** کوارتز وک با جورشدگی ضعیف و آشفتگی زیستی




**شکل ۹** رس‌سنگ دارای ذرات پراکنده سیلت



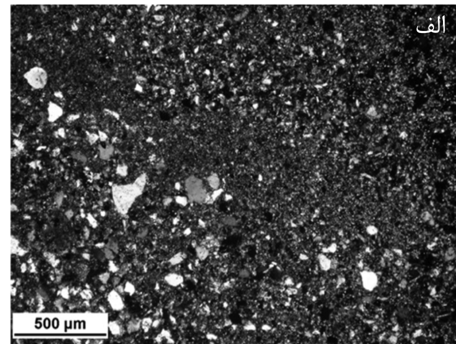

**شکل ۱۰** انیدریت نودولار

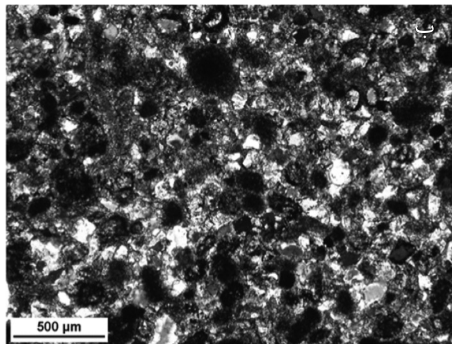
تراکم و پهن شدگی نودول‌ها از فرآیندهای قابل ذکر دیاژنزی در این رخساره است. انیدریت به‌طور غالب در زون‌های A و C مشاهده شده است.

**رخساره‌های هیبرید (کربناته ـ آواری)**

رخساره هیبرید در مقاطع مورد مطالعه به دو صورت دولومادستون ماسه‌ای و دولوگرینستون اوویید[1] ماسه‌ای مشاهده شده است (شکل ۱۱). رخساره دولومادستون ماسه‌ای متشکل از ذرات آواری کوارتز بوده که در یک زمینه دولومیتی پراکنده هستند (شکل ۱۱ـ الف). دولومیتی‌شدن در این رخساره در مراحل اولیه دیاژنز اتفاق افتاده چون اندازه بلورهای دولومیت در حد میکرایت تا میکرواسپار است. ذرات کوارتز تشکیل‌دهنده جورشدگی پایین داشته و زاویه‌دار هستند. پیریت و در مواردی نودول‌های انیدریت به‌میزان کم در این رخساره مشاهده شده است. ذرات اصلی تشکیل‌دهنده رخساره دولوگرینستون ماسه‌ای شامل اوویید و کوارتز در یک زمینه آهک دولومیتی تا دولومیتی می‌باشد (شکل ۱۱ـ ب). اوویید‌ها به‌طور عمده دارای هسته کوارتزی و دارای فابریک مماسی هستند. در برخی مقاطع اوویید‌ها آغشتگی زیادی با اکسید آهن پیدا کرده‌اند که بیانگر شرایط اکسیدان در زمان رسوب‌گذاری آن‌ها می‌باشد. مهم‌ترین سیمان موجود در این پتروفاسیس، سیمان کلیستی دور دانه‌ای در اطراف ذرات اوویید و پرکننده فضاهای خالی است. اجزای فرعی شامل پیریت و در مواردی انیدریت می‌باشد. وجود بیوکلستیت‌های نامشخص (دوکفه‌ای) از دیگر اجزای با فراوانی اندک در این رخساره است. رخساره دولومادستون ماسه‌ای در بخش‌هایی از زون C، ابتدای زون‌های A و E وجود دارد که به‌نظر می‌رسد گسترش آن به‌سمت شمال شرقی میدان بیشتر می‌باشد. پتروفاسیس دولوگرینستون اوویدی ماسه‌ای در اکثر چاه‌های مورد مطالعه در بخش‌های میانی و بالایی زون C مشاهده شده است. ضخامت این رخساره متغیر بوده و به‌طور کلی، از سمت جنوب شرقی به شمال غربی میدان خانگیران، افزایش می‌یابد.

1. Ooid




**شکل ۱۱** الف) دولومادستون ماسه‌ای با ذرات پراکنده کوارتز ب) رخساره دولوگرینستون ماسه‌ای.

پراکندگی رخساره‌های رسوبی در امتداد توالی سازند شوریجه در چاه کلیدی نشان داده شده است (شکل ۱۲).

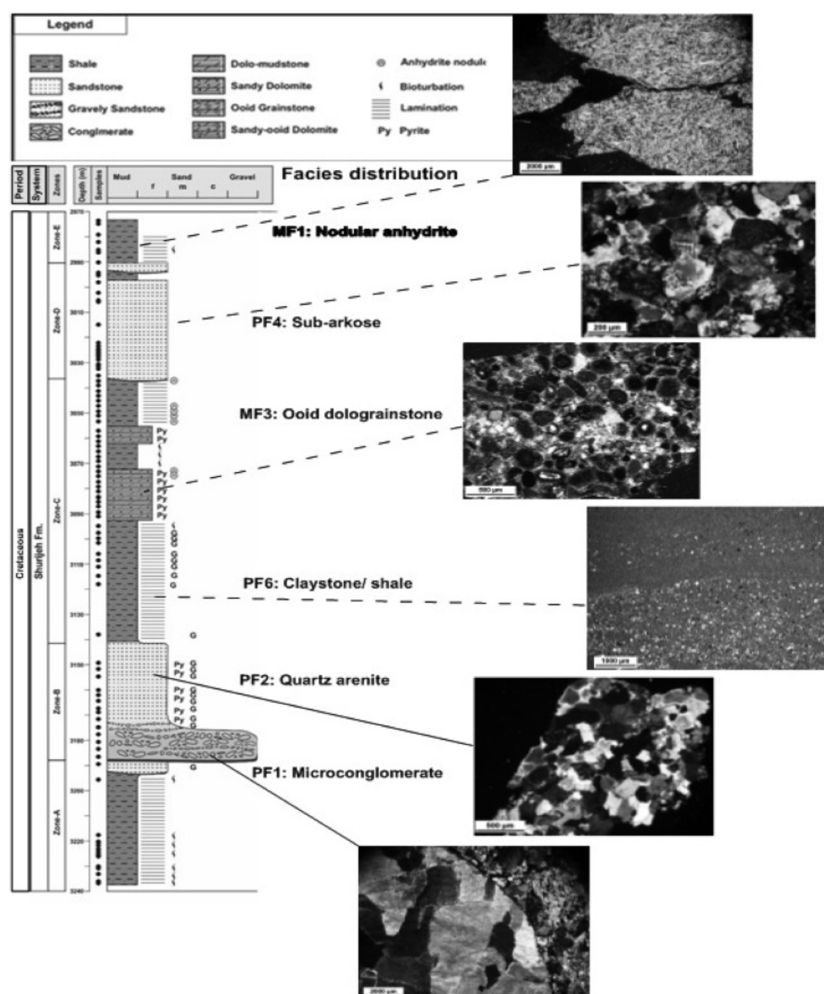
## محیط و مدل رسوبی سازند شوریجه

مطالعات میکروسکوپی رخساره‌های سازند شوریجه در چاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که بخش عمده توالی سازند شوریجه در زون‌های B و D چاهای مورد مطالعه در میدان خانگیران، به‌ویژه در بخش‌های شرق و جنوب شرق، از پتروفاسیس‌های ماسه‌سنگ و میکروکنگلومرا تا ماسه گراولی ریز شونده به‌سمت بالا مربوط به رودخانه‌های بریده بریده و گاهی مئاندری تشکیل شده است . به‌نظر می‌رسد گسترش این پتروفاسیس‌ها در ارتباط با مهاجرت جانبی کانال‌ها می‌باشد. علاوه‌بر این، میزان کمی از نهشته‌های رسی و سیلتی قرمز رنگ مربوط به بخش دشت سیلابی در این بخش مشاهده می‌گردد. بخش میانی توالی سازند شوریجه (زون C) نیز به‌نظر می‌رسد در بخش پر انرژی کولاب تا سدهای جزر و مدی گسترش پیدا کرده است. در ادامه، بخش‌های A و E به‌طور عمده در محیط دشت سیلابی تا پهنه جزر و مدی نهشته شده‌اند. جایگزینی نودول‌های انیدریت در رخساره‌های رس سنگ و نسبت کم ماسه به شیل بیانگر رسوب‌گذاری آن‌ها در یک محیط رسوبی بسته (دریاچه‌های شاخ گاوی و دشت سیلابی) در شرایط آب و هوای گرم و خشک می‌باشد (شکل ۱۳). براساس نقشه نشانگر همسانی و مطالعات انجام شده توسط حسین یار در افق A، جهت جریان دیرینه سیستم رودخانه‌ای میدان خانگیران در امتداد جنوب غرب شمال شرق بوده است که در پایین دست مسیر حرکت رودخانه به‌سمت شمال- شمال غرب تغییر کرده است. سیستم رودخانه‌ای از نوع بریده بریده با کانال‌های مختلف و پیچیدگی کم در واحدهای A و B در بخش جنوبی میدان خانگیران، در جهت شمال شرقـ شرق جریان داشته که در بخش شمال میدان به دلیل عملکرد گسل پی سنگی کپه داغ (عشق آباد) به‌سمت شمال غرب ـ غرب تغییر جهت داده‌اند [۱۲].

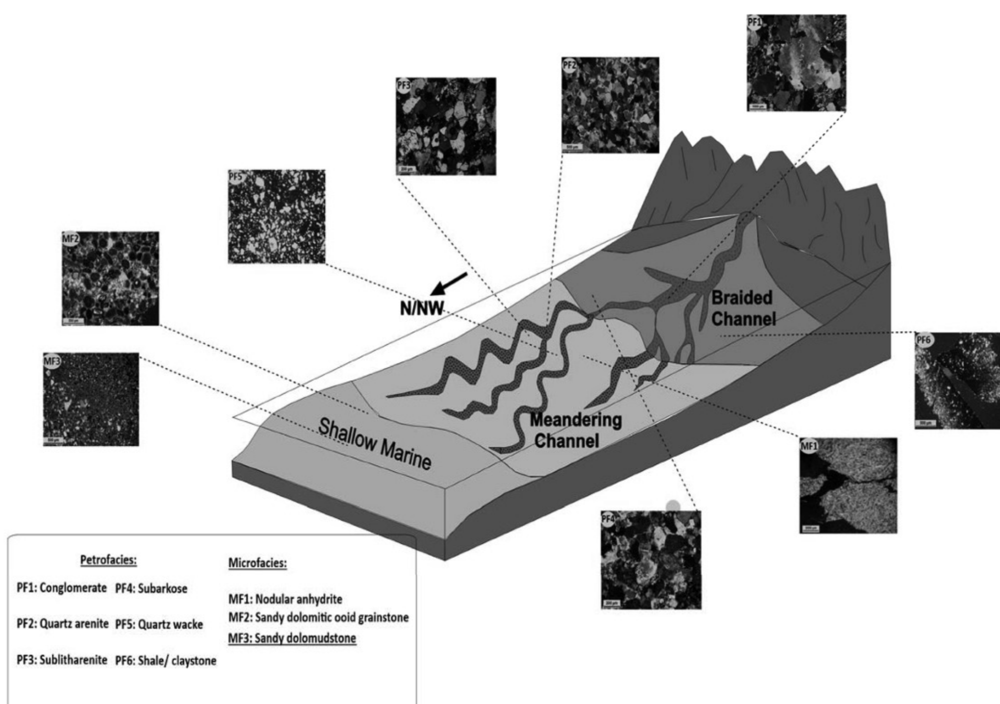
## فرآیندهای دیاژنزی کنترل‌کننده کیفیت مخزنی در سازند شوریجه

### آشفتگی زیستی

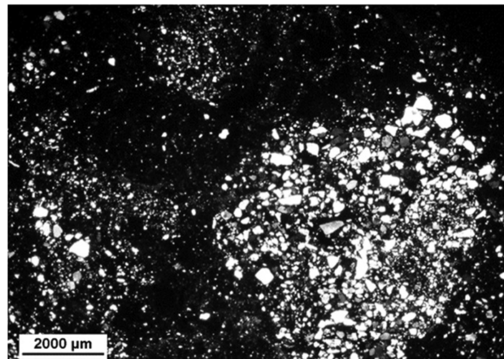
آشفتگی زیستی پدیده‌ای رایج در سنگ‌های رسوبی بوده و به عوامل مختلفی از جمله نرخ رسوب‌گذاری، وجود مواد غذایی و اکسیژن در محیط رسوبی بستگی دارد [۱۳]. فرآیند آشفتگی زیستی یا بهم ریختگی رسوبات توسط موجودات زنده در سازند شوریجه به‌طور غالب در رخساره‌های گلی و ریز دانه و گل غالب (کوارتز وک) مشاهده می‌شود (شکل ۱۴). پدیده آشفتگی زیستی می‌تواند اثر مثبت یا منفی برروی خصوصیات مخزنی به‌ویژه تراوایی مخزن داشته باشد [۱۴].




**شکل ۱۲** توزیع رخساره‌های رسوبی در امتداد توالی چاه کلیدی سازند شوریجه




**شکل ۱۳** مدل شماتیکی از محیط رسوب‌گذاری سازند شوریجه در سیستم‌های رودخانه‌ای بریده بریده و مئاندری




**شکل ۱۴** آشفتگی زیستی در پتروفاسیس کوارتز وک

**سیمانی‌شدن**

سیمانی‌شدن یکی از مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی است و درزمانی‌که سیال‌های منفذی از فاز سیمان فوق اشباع هستند تشکیل می‌شود. ترکیب و مورفولوژی سیمان در تفسیر منشاء آن و بازسازی تاریخچه دیاژنزی ارزشمند است [۱۵]. سیمانی‌شدن از فراوان‌ترین پدیده‌های دیاژنزی در سازند شوریجه می‌باشد. فراوان‌ترین سیمان‌های موجود شامل سیمان‌های سیلیسی، کربناته، هماتیتی و به‌مقدار کمتر انیدریتی می‌باشند. در مقاطع نازک مورد مطالعه از سازند شوریجه، سیمان‌های سیلیسی، کلسیتی، دولومیتی، هماتیتی و انیدریتی به‌شرح زیر مشاهده شده‌اند.

**سیمان سیلیسی**

سیمان‌های سیلیسی در مراحل اولیه تدفین در سازند شوریجه نهشته شده و فضاهای خالی بین ذرات را پر کرده‌اند، هر چند در مقایسه با سیمان‌های کربناته از گسترش و فراوانی کمتری برخوردار هستند. از انواع سیمان‌های سیلیسی قابل مشاهده در سازند شوریجه می‌توان به سیمان کوارتزی رورشدی اشاره کرد (شکل ۱۵). سیمان رشد ثانویه کوارتز به‌طور معمول در زون‌های حاوی آب نهشته می‌شود زیرا سیلیس در آب قابل حل بوده اما در نفت قابل حل نمی‌باشد [۱۶]. در نتیجه، عدم حضور یا کم بودن این نوع سیمان در ماسه‌سنگ‌ها علاوه‌بر اثبات مواردی چون عدم وجود منبع سیلیس مورد نیاز می‌تواند نشان‌دهنده مهاجرت زود هنگام هیدروکربن به داخل سازند بوده که مانع از گسترش سیمان‌های سیلیسی شده‌اند [۱۸ و ۱۷].

**سیمان کلسیتی**

سیمان کلسیتی در سازند شوریجه طی دیاژنز اولیه و دفنی و به‌صورت بلورهای موزاییکی و پوکیلیوتوپیک تشکیل شده است (شکل۱۶). ماسه‌سنگ‌های سازند شوریجه قبل از دفن عمیق و اثر تراکم رسوبات فوقانی، تحت تأثیر سیمانی‌شدن کلسیتی قرار گرفته‌اند و گاهی باعث تشکیل ماسه‌سنگ‌های دارای سطحوح تماسی بسیار کم بین دانه‌ها شده‌اند. [۱۹].

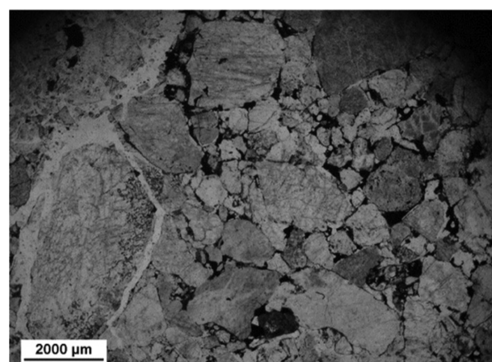
**سیمان اکسید آهن (هماتیتی)**

ماسه‌سنگ‌های سازند شوریجه در مقاطع میکروسکوپی به رنگ قرمز بوده که این رنگ قرمز به‌دلیل وجود سیمان هماتیتی در اطراف ذرات، در مرز بین دانه‌های کوارتز و سیمان رشد اضافی و همچنین به‌صورت پراکنده در زمینه نمونه‌های حاوی ذرات گل می‌باشد (شکل ۱۷). وجود سیمان هماتیتی نشان‌دهنده ته نشست این رسوبات در اقلیم نیمه‌خشک و شرایط فیزیکوشیمیایی اکسیدی است [۲۱ و ۲۰].

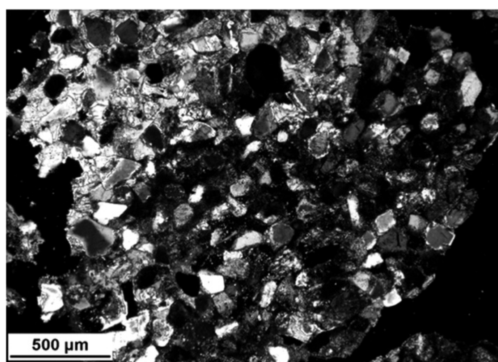
**سیمان انیدریتی**

سیمان‌های انیدریتی و همچنین سایر سولفات‌ها به‌عنوان سیمان‌های دیاژنتیک در ماسه‌سنگ‌ها دیده می‌شوند که گاه اثر بسیار زیادی برروی کیفیت مخزنی سازندها ایفا می‌کنند [۲۲].

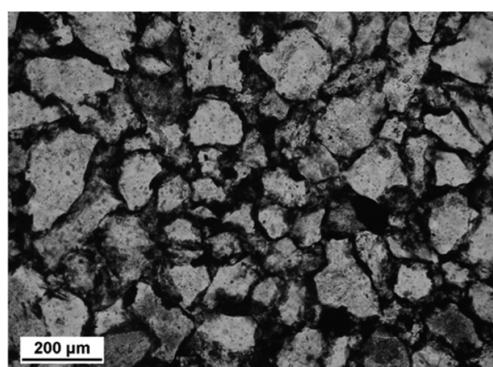
پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۵۹-۳۶




**شکل ۱۵** سیمان دور دانه‌ای در پتروفاسیس کنگلومرا




**شکل ۱۶** سیمان کلسیتی پویکیلوتوپیک

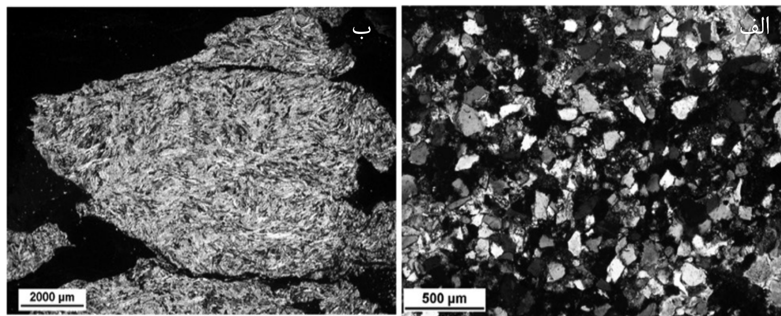



**شکل ۱۷** سیمان هماتیتی در پتروفاسیس ساب‌آرکوز

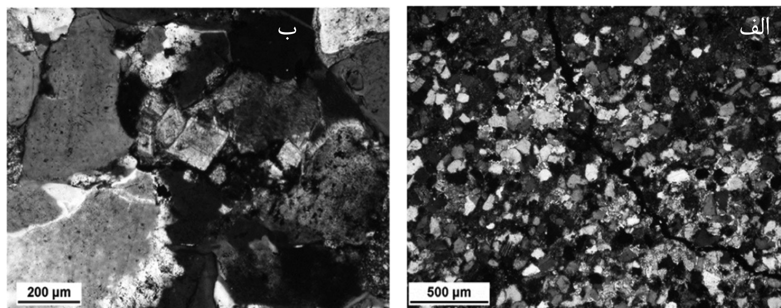
نمونه‌هایی با درصد انیدریت پایین‌تر دارای بافت پوکیلیوتوپیک هستند و توزیع پراکنده انیدریت، تخلخل و تراوایی بالاتری را نشان می‌دهد و نمونه‌هایی با درصد انیدریت بالاتر، دارای بافت نودولار هستند و توزیع یکنواخت انیدریت را نشان می‌دهند [۲۳]. در سازند شوریجه، سیمان‌های انیدریتی به‌صورت پرکننده فضاهای خالی (شکل ۱۸ـ الف) و در برخی افق‌ها به‌ویژه در رخساره‌های رس‌سنگی به‌صورت نودول‌های انیدریتی نیز مشاهده می‌شوند (شکل ۱۸ـ ب). میزان فراوانی این سیمان به‌ویژه در رخساره‌های رس سنگ بیشتر می‌باشد. مطالعات پتروگرافی نشان می‌دهد که سیمان‌های انیدریتی از انواع اولیه بوده و قبل از اولین مرحله از سیمان‌های کربناته نهشته شده‌اند.

**سیمان دولومیتی و دولومیتی‌شدن**

یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین نوع جابه‌جایی در سنگ‌های آهکی، جایگزینی کربنات منیزیم و کربنات کلسیم و تشکیل دولومیت است [۲۴]. فرآیند دولومیتی‌شدن در نمونه‌های مطالعه شده سازند شوریجه، در دو مرحله دیاژنزی صورت گرفته و در نتیجه دو نوع دولومیت از نظر اندازه بلوری تشکیل شده است. نوع اول این دولومیت‌ها بسیار ریز بلور بوده که پس از ته نشست و قبل از سیمانی‌شدن رسوب در طی دیاژنز اولیه تشکیل شده‌اند [۲۵]. در بعضی نمونه‌ها، بلورهای دولومیت در اندازه اسپار و میکرواسپار به‌طور کامل زمینه ماسه‌سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند، به‌طوری که تماس بین دانه‌ها در آن‌ها بسیار کم شده و در برخی موارد به دولوستون ماسه‌ای تبدیل شده‌اند (شکل ۱۹ـ الف). نوع دوم از دولومیت‌ها به‌صورت بلورهای درشت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار تشکیل شده است (شکل ۱۹ـ ب). این بلورهای دولومیت به‌طور معمول به‌صورت جانشینی کلسیت و یا کوارتز رشد اضافی بوده که این نشان‌دهنده تاخیری بودن این نوع دولومیت‌ها در توالی پاراژنتیکی و تشکیل آن‌ها در طی دیاژنز دفنی است.




**شکل ۱۸** الف) سیمان انیدریتی پرکننده فضاهای خالی، ب) نودول انیدریتی در پتروفاسیس رس سنگ




**شکل ۱۹** الف) دولومیتی‌شدن و تشکیل بلورهای ریز دولومیت، ب) بلورهای خودشکل دولومیتی پر کننده حفرات در رخساره ساب آرکوز

رومبوهدرهای دولومیت در برخی موارد، فضاهای خالی موجود را به‌طور کامل پرکرده‌اند [۲].

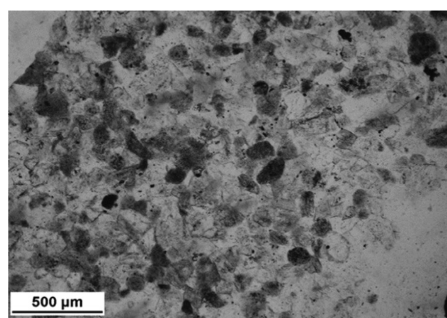
**کانی‌زایی پیریت (پیریتی‌شدن)**

پیریت یکی از محصولات دیاژنزی اولیه و خاص محیط‌های احیایی است که تشکیل آن، ناشی از عبور اکسید آهن از محیط سولفیدی و واکنش سولفید هیدروژن تولید شده توسط باکتری‌های احیاکننده است [۲۴]. کانی پیریت در سازند شوریجه، به‌صورت بلورهای ریز و پراکنده قابل مشاهده است (شکل ۲۰). به‌طور کلی، تشکیل پیریت‌ها هم در مرحله دیاژنز آغازین و هم در طی دیاژنز دفنی اتفاق می‌افتد. پیریت‌های اولیه به‌طور معمول به‌صورت بلورهای خوشه‌ای بوده و در طی مراحل اولیه دفن به‌وجود می‌آیند [۲۵]. در مقابل پیریت‌های دفنی دارای بلورهای درشت‌تر بوده و نیمه شکل‌دار هستند. این پیریت‌ها یکی از آخرین سیمان‌هایی بوده که همراه با احیای هماتیت و در حضور هیدروکربن‌ها تشکیل می‌شوند [۲۶].

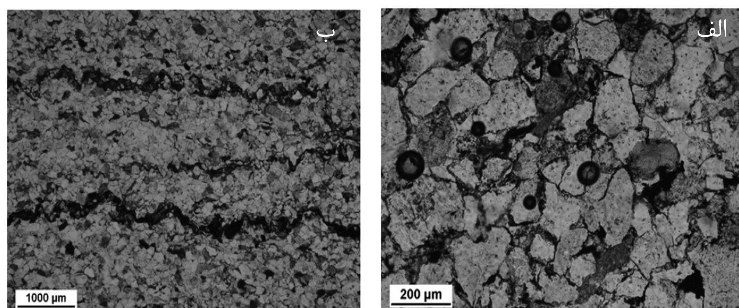
**تراکم**

تراکم به‌طور معمول از مراحل اولیه دیاژنز آغاز شده و در مرحله دیاژنز میانی به حداکثر میزان خود می‌رسد. این فرآیند به‌طور معمول ناشی از افزایش بار طبقات بالایی در طی دفن عمیق اتفاق می‌افتد اما گاهی اوقات می‌توانند ناشی از نیروهای تکتونیکی مؤثر در منطقه نیز باشد. این فرآیند در سازند شوریجه به دو صورت مکانیکی و شیمیایی قابل مشاهده است. فشردگی مکانیکی در مراحل اولیه و انتهایی دیاژنز صورت گرفته و به شکل‌های مختلفی (شکل ۲۱ـ الف) از جمله تغییر شکل ذرات شکل‌پذیر (مانند قطعات خرده سنگی و فلدسپات‌ها)، خمیدگی یا شکستگی برخی دانه‌ها، خاموشی موجی دانه‌های کوارتز و انواع تماس بین دانه‌ای قابل مشاهده است [۲]. تراکم شیمیایی نیز به‌میزان کم و به‌صورت انحلال فشاری و استیلولیتی شدن، درزه‌های انحلالی و سطح تماس مضرسی دانه‌ها دیده می‌شود (شکل ۲۱ـ ب).

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۵۹-۳۶



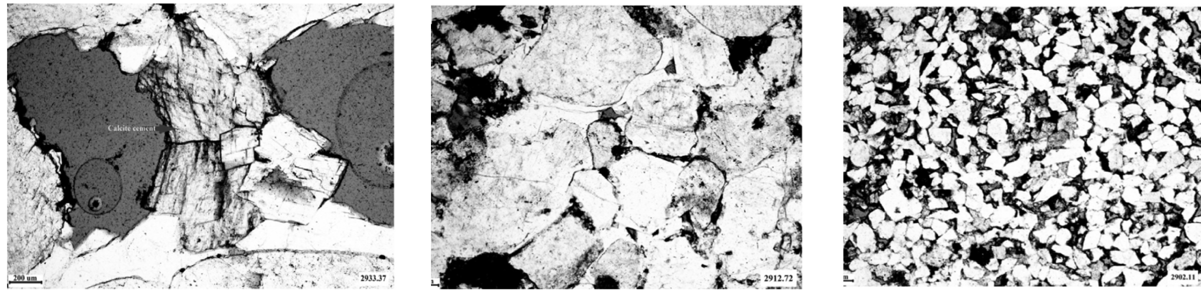

**شکل ۲۰** پیریت خوشه‌ای در رخساره کوارتز آرنایت




**شکل ۲۱** الف) سطح تماس مقعر ـ محدب بین دانه‌های کوارتز در اثر تراکم مکانیکی در رخساره کوارتز آرنایت ب) استیلولیت و درز انحلالی در اثر تراکم شیمیایی در رخساره کوارتز آرنایت

**تخلخل**

براساس مطالعات پتروگرافی انجام شده تخلخل در ماسه‌سنگ‌های سازند شوریجه از نوع اولیه (بین دانه‌ای) و ثانویه (انحلالی) می‌باشد (شکل ۲۲- الف). این تخلخل‌ها بیشتر در رخساره‌های دانه درشت شامل ماسه‌سنگ‌های درشت دانه، میکروکنگلومرا و ماسه‌های گراولی بخش پایینی این سازند رواج دارند (شکل ۲۲- ب). سایر واحدهای ماسه‌سنگی این سازند به‌علت حضور گسترده انواع سیمان‌های کلسیتی، سیلیسی و انیدریتی و همچنین وجود رس، دارای کیفیت ضعیف‌تری هستند. جدایش چینه‌ای و ایزوله شدن هیدرولوژیکی این واحدهای ماسه‌ای توسط لایه‌های نازک گل‌سنگ و شیل نفوذناپذیر باعث جلوگیری از ایجاد تخلخل ثانویه حاصل از انحلال سیمان‌های کربناته توسط سیالات اسیدی ناشی از تراکم و فشارش ستون رسوبات می‌شود که این امر نیز باعث ضعیف‌تر شدن کیفیت مخزنی این بخش‌ها در سازند شوریجه می‌شود. تخلخل ثانویه در بخش‌های مطالعه شده این سازند شامل خلل و فرج ناشی از انحلال سیمان‌های کربناته می‌باشد. اندازه بزرگ این خلل و فرج و حضور بقایای سیمان‌های کربناته در آن‌ها بیانگر این مطلب است که این فضاهای خالی در نتیجه انحلال سیمان‌های کربناته تولید شده‌اند (شکل ۲۲- ج). انحلال انیدریت نیز می‌تواند تا حد کمی در تولید تخلخل ثانویه مؤثر باشد اما شواهد خاصی مبنی بر این مطلب در مقاطع مورد مطالعه به‌ندرت مشاهده شده است. انحلال کلسیت درزمانی‌که این ماسه‌سنگ‌ها در معرض آب‌هایی با pH پایین در رژیم فشارشی قرار گرفته اند، صورت گرفته است [۲۷]. لازم به ذکر است که تخلخل ناشی از شکستگی نیز به‌ندرت در مقاطع مورد مطالعه مشاهده شده است (شکل ۲۲- د). پراکندگی فرآیندهای مختلف دیاژنزی در امتداد توالی چاه کلیدی سازند شوریجه نشان داده شده است (شکل ۲۳).




**شـــکل ۲۲** الـف) تخلخل‌هـای انحلالـی و بیـن دانـه‌ای، ب) تخلخـل بیـن دانـه‌ای حفـظ شـده در بیـن سـیمان‌های کوارتـزی رشـد اضافـی، ج) بقایـای سـیمان کلسـیتی در خلـل و فـرج نمونـه

Legend
Shale
Sandstone
Gravely Sandstone
Conglmerate
Dolo-mudstone
Sandy Dolomite
Ooid Grainstone
Sandy-ooid Dolomite
Anhydrite nodule
Bioturbation
Lamination
Py Pyrite

Diagenesis distribution
Bioturbation
Cementation
Dolomitization
Cementation
Compaction
Porosity
Fracturing

**شکل ۲۳** توزیع فرآیندهای دیاژنزی در امتداد توالی چاه کلیدی سازند شوریجه

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۵۹-۳۶

### توالی پاراژنتیکی در سازند شوریجه

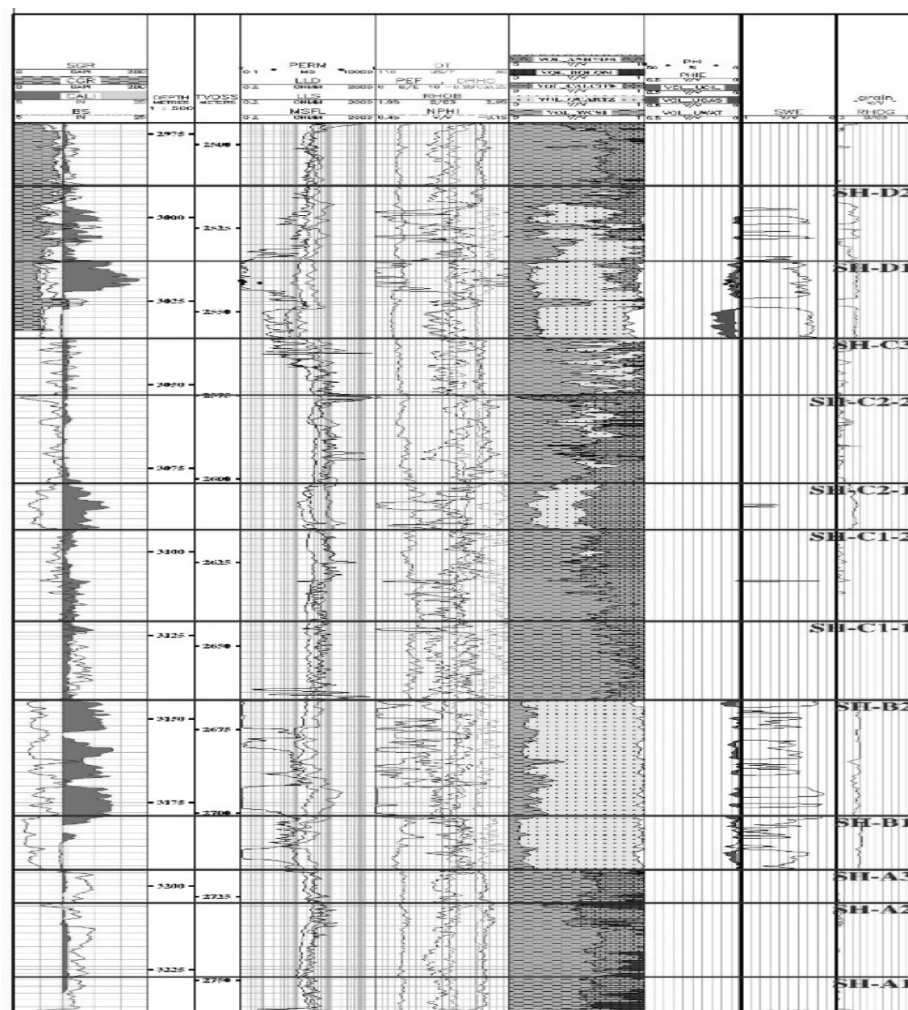
مطالعات پتروگرافی نشان می‌دهد چاه‌های مورد مطالعه سازند شوریجه تحت تاثیر فرآیندهای دیاژنتیک در سه مرحله پیشین، تدفینی و بالا آمدگی قرار گرفته‌اند (جدول ۱). در مرحله پیشین دیاژنز، چرخش آب‌های متئوریک در داخل رسوبات ماسه‌سنگی باعث دگرسانی فلدسپات‌ها و میکاها شده است. با توجه به ترکیب اکسیدی آب‌های درون حفره‌ای در این مرحله، پوشش‌های اکسید آهن (هماتیت) برروی دانه‌های آواری مانند کوارتز صورت گرفته است. همچنین، به‌هم‌ریختگی رسوبات توسط جانداران در این مرحله با توجه به‌وجود اکسیژن و شرایط مناسب اتفاق افتاده است. در بخش‌هایی که میزان تراکم فیزیکی رسوبات ماسه‌سنگی کمتر بوده است، تشکیل سیمان‌های کلسیتی و دولومیتی صورت گرفته و تا مرحله تدفینی دیاژنز نیز ادامه داشته است. اما در بخش‌هایی که میزان رسوبات دانه‌ریز زیاد بوده است، تراکم فیزیکی بیشتر بوده و مانع تشکیل سیمان‌های کلسیتی شده است، درحالی‌که ته‌نشست انیدریت به‌صورت نودول در این بخش‌ها صورت گرفته و گاهی به‌صورت سیمان به داخل لایه‌های پایین‌تر نفوذ کرده است. در مرحله تدفینی، فشردگی مکانیکی ادامه داشته و با افزایش عمق تدفین، انحلال فشاری و استیلولیتی شدن در مرز تماس بین ذرات ماسه‌سنگی رخ داده است. سیلیس حاصل از فرایند انحلال فشاری به‌همراه سایر سیلیس موجود در فضاهای خالی به‌صورت سیمان رورشدی هم‌محور در اطراف ذرات کوارتز ته‌نشست پیدا کرده است. همچنین، تشکیل پیریت در حضور احیای اکسید آهن در این مرحله صورت گرفته است. در نهایت، بالاآمدگی تکتونیکی باعث رخنمون یافتن بخش‌هایی از توالی سازند شوریجه شده که دوباره تحت تأثیر اکسیداسیون و تشکیل سیمان اکسید آهن و تراکم فیزیکی قرار گرفته‌اند.

**جدول ۱** توالی پاراژنتیکی سازند شوریجه در چاه‌های مورد مطالعه

| مراحل دیاژنز / فرآیندهای دیاژنز | دیاژنز اولیه | دیاژنز میانی | دیاژنز انتهایی |
|---|---|---|---|
| آشفتگی زیستی | ———- - - - | | |
| سیمان هماتیتی | ——— | | ——— |
| دولومیتی‌شدن اولیه | - - - - - - | | |
| سیمان کلسیتی | ——— | ——— | |
| سیمان سیلیسی | | ——— | |
| سیمان دولومیتی | | ——— | |
| سیمان انیدریتی | ——— | ——— | |
| تراکم فیزیکی | ——— | ——— | ——— |
| تراکم شیمیایی | | ——— | |
| پیریتی‌شدن | | ━━━ | |
| فرآیند دیاژنزی منفی<br>فرآیند دیاژنزی مثبت<br>فرآیند دیاژنزی خنثی | | ———<br>- - - - - -<br>━━━ | |

## مقایسه مطالعات پتروگرافی و پتروفیزیکی

نتایج حاصل از ارزیابی پتروفیزیکی برای سازند شوریجه در چاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد از نظر ترکیب کانی‌شناسی، سازند شوریجه به‌طور عمده از کانی‌های کوارتز، کلسیت، دولومیت و انیدریت تشکیل شده است. شرایط مخزنی زون‌های موجود را می‌توان در ارتباط با ویژگی‌هایی مانند ترکیب کانی‌شناسی، اندازه و جورشدگی ذرات، نوع سیمان بین آن ها و غیره مورد بررسی قرار داد. براساس محاسبات و تغییرات پارامترهای پتروفیزیکی و تلفیق این نتایج با مطالعات پتروگرافی، سازند شوریجه در چاه کلیدی میدان مورد مطالعه به ۱۱ زون تقسیم شده است (شکل ۲۴). همان‌طور که در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود زون‌های B و D با ظهور و غلبه رخساره‌های ماسه‌سنگی و با پوشش رخساره‌های شیلی و همچنین به‌علت تخلخل بیشتر در رخساره‌های دانه درشت، با خصوصیات مخزنی خوب مشخص است که قابل انطباق با نتایج حاصل از مطالعات مقاط نازک می‌باشد. طبق مطالعات مقاطع نازک زون B و D سازند شوریجه از رخساره‌های ماسه‌سنگی تشکیل شده‌اند که تحت تأثیر فرآیندهای دیاژنتیکی چون تخلخل، شکستگی ناشی از انحلال، استیلولیت و دولومیتی‌شدن قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۱۲ و ۲۳). افق D از نظر مخزنی بهتر از زون B است که می‌توان آن را در ارتباط با دولومیتی‌شدن، اندازه ذرات ماسه و جورشدگی آن‌ها در نظر گرفت.




**شکل ۲۴** نمایی گرافیگی از نتایج محاسبات احتمالی انجام شده در چاه کلیدی میدان خانگیران

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۵۹-۳۶

**بررسی فرآیندهای دیاژنز با نمودارهای تصویرگر**

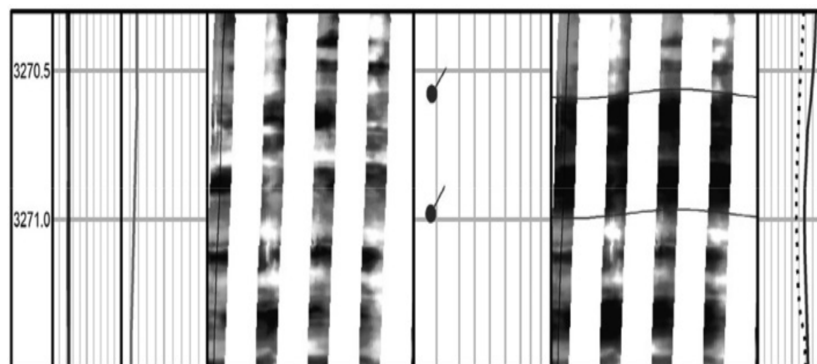
نمودارهای تصویرگر سازند اطلاعات مهمی در مورد شکستگی‌ها ارائه می‌دهند. به‌علاوه با تفسیر آن‌ها میتوان سایر پدیده‌های زمین‌شناسی مانند لایه‌بندی، استیلولیت، گسل‌ها و گرهک‌های انیدریت را شناسایی نمود. تخلخل، تراوایی و ناهمگونی مخزن[1] از سنجه‌های مهم دیگر هستند که می‌توان از تحلیل نمودارهای تصویری محاسبه نمود. به‌طور کلی شکستگی‌ها نقش مهمی در تولید از مخازن شکافدار ایفا می‌کنند [۲۹]. اگر هدف از مطالعه سنگ‌ها و توالی‌های رسوبی رسیدن به محیط و فرآیندهای رسوبی باشد، در ابتدا باید رخساره‌های مختلف موجود در آن محیط را شناخت. به‌دلیل مشکلات ناشی از تهیه مغزه، نمودارهای تصویرگر جانشین مناسبی برای شناخت و مطالعه بافت‌ها هستند. نمودارهای تصویرگر در شناخت ساخت‌ها و عوارض رسوبی کوچک مقیاس کمک زیادی می‌کنند. در این مطالعه با استفاده از نمودار تصویرگر توسط نرم‌افزار ژئولاگ نسخه ۸ به تفسیر فرآیندهای دیاژنز در چاه کلیدی چاه‌های مورد مطالعه برای تطابق با نتایج حاصل از مطالعه مقاطع نازک پرداخته شده است. در تفسیر نمودارهای تصویری، ویژگی‌های ساختاری مانند لایه‌بندی[2]، استیلولیت، رگچه‌های انحلالی[3]، لامیناسیون، شکستگی‌ها و ریزش‌های متقارن[4] در طی حفاری شناسایی شده‌اند. این بررسی نشان می‌دهد که در اکثر موارد انطباق خوبی بین بررسی فرآیندهای دیاژنز براساس مطالعات مقاطع نازک و مطالعه فرآیندهای دیاژنز براساس نمودارهای تصویرگر وجود دارد.

**لایه‌بندی**

شیب ساختاری با استفاده از مرزهای لایه‌بندی شناسایی شده از روی لاگ تصویری تعیین شد. این سطوح به‌طور معمول نشان‌دهنده تغییرات ناگهانی لیتولوژی می‌باشند، که توسط پدیده‌های دیاژنزی و تکتونیکی تحت تأثیر قرار نگرفته‌اند [۳۰]. در نمودار تصویرگر لایه‌ها با رنگی تیره در زمینه روشن‌تر مشاهده می‌شوند. این خطوط تیره اغلب به‌صورت موجی تا مستقیم در نمودار مشاهده می شوند. نمونه‌ای از لایه‌بندی چاه کلیدی مورد مطالعه برروی نمودار تصویرگر FMS نشان داده شده است (شکل ۲۵).

**لامیناسیون**

لامیناسیون نشان‌دهنده تغییرات جزئی در رسوبات به‌هنگام رسوب‌گذاری می‌باشد. به‌طور معمول تغییرات دوره‌ای در تامین رسوبات باعث ایجاد لامینه‌ها می‌شود.



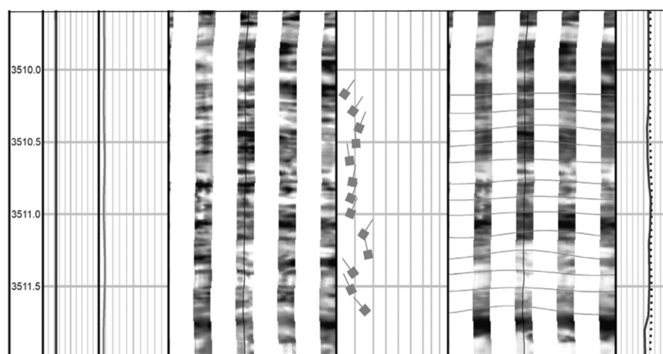

**شکل ۲۵** نمونه ای از لایه‌بندی چاه مورد مطالعه در لاگ تصویری FMS

1. Heterogeneity
2. Bedding
3. Solution Seam
4. Breakout

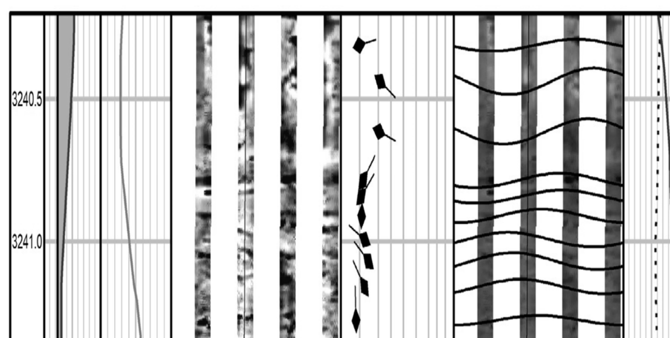
این تغییرات می‌تواند در اندازه دانه‌ها، درصد رس، محتوای میکروفسیل و میزان ماده آلی ایجاد شود. به‌دلیل قدرت تفکیک بالا در نمودارهای تصویرگر، لامینه نیز به‌صورت بسیار نازک که به‌طور کامل پیوسته نیستند در نمودار مشاهده می‌شوند و بیانگر محیطی با انرژی پایین می‌باشند [۳۰]. نمونه‌ای از لامیناسیون شناسایی شده در چاه کلیدی مورد مطالعه برروی لاگ تصویری FMS نشان داده شده است (شکل ۲۶).

**استیلولیت**

استیلولیت نشان‌دهنده انحلال شیمیایی و تراکم است. عمده‌ترین مواد پرکننده استیلولیت‌ها کانی‌های رسی هستند و به همین دلیل در نمودارهای تصویرگر به‌جهت رسانایی بالای الکتریکی تیره‌تر دیده می‌شوند، ولی گاهی امکان دارد مواد هیدروکربوری در صفحه استیلولیت‌ها متجمع شوند که در این صورت روشن‌تر به‌نظر می‌رسند. استیلولیت‌ها در کربنات‌ها به‌وفور دیده می‌شوند. در چاه‌های مورد مطالعه بیشتر استیلولیت‌ها موازی و یا نیمه موازی با لایه‌بندی‌ها هستند [۹]. استیولیت‌ها معمولا به‌صورت دسته‌ای دیده می‌شوند و در مقطع عرضی به‌صورت مضرسی (زیگ زاگ) دیده می‌شوند. استیلولیت‌ها به‌طور معمول با مواد نامحلول مانند کانی‌های رسی، اکسید آهن و مواد ارگانیک پر می شوند. عمود بر جهت استیولیت‌ها معمولا سدهای تراوایی ایجاد می‌شود، درحالی‌که در امتداد آن‌ها ممکن است انتقال جریان در سنگ تسهیل شود. همچنین در زون‌های استیلولیتی، تخلخل به‌میزان زیادی (در اثر انحلال فشارشی) کاهش می‌یابد [۳۰]. تراکم استیلولیت‌ها در چاه مورد مطالعه بالا می‌باشد. استیلولیت‌ها در نمودار تصویرگر اغلب به‌رنگ تیره دیده می‌شوند. تفاوت استیلولیت‌ها با لایه‌های شیلی نازک، بی‌نظمی استیلولیت‌هاست. نمونه‌ای از استیلولیت‌های شناسایی شده در چاه کلیدی مورد مطالعه برروی لاگ تصویری FMS نشان داده شده است (شکل ۲۷).




**شکل ۲۶** تعدادی از لامینه‌های برداشت شده چاه مورد مطالعه از لاگ تصویری FMS




**شکل ۲۷** تعدادی از استیلولیت‌های شناسایی شده در چاه مورد مطالعه از لاگ تصویری FMS

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۵۹-۳۶

**رگچه انحلالی**

رگچه‌های انحلالی نیز مانند استیلولیت‌ها محصول انحلال فشارشی می‌باشند. رگچه‌های انحلالی دارای ظاهر صاف‌تری نسبت به استیلولیت‌ها می‌باشند و با توجه به این تفاوت، می‌توان آن‌ها را نسبت به استیلولیت‌ها متمایز کرد [۳۰]. تعدادی از رگچه‌های انحلالی چاه کلیدی مورد مطالعه در نمودار تصویرگر FMS نشان داده شده است (شکل ۲۸).

**شکستگی‌های باز**

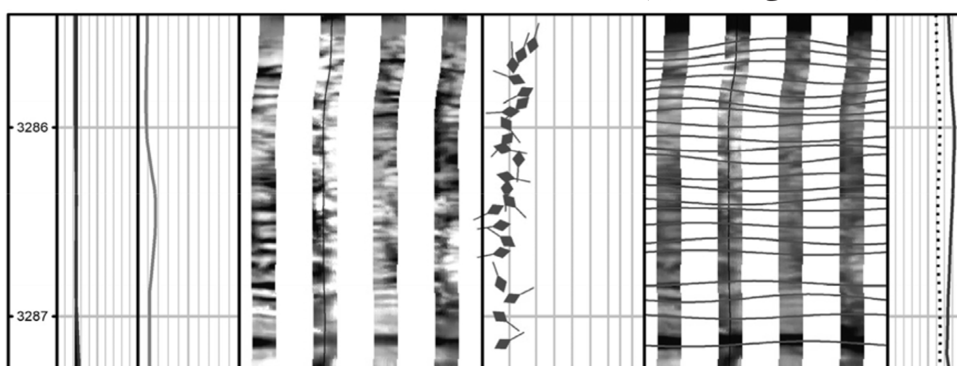
به‌طور کلی تراوایی سازند در موازات شکستگی‌های باز افزایش می‌یابد. تراوایی حاصل از شکستگی‌های باز تابعی از بازشدگی آن‌ها، میزان تنش واردهِ عمود بر امتداد شکستگی و زبری سطوح شکستگی است. برخی از پارامترهای زمین‌شناسی برروی تراکم شکستگی‌های طبیعی مؤثر می‌باشند. این پارامترها عبارتند از: لیتولوژی، اندازه دانه، تخلخل، ضخامت لایه‌بندی، موقعیت ساختاری [۳۰]. شکستگی‌های باز به‌صورت یک موج سینوسی کامل یا ناپیوسته و تیره‌رنگ در نمودار تصویرگر دیده می‌شود. نمونه‌ای از شکستگی‌های باز شناسایی شده در چاه کلیدی مورد مطالعه برروی نمودار تصویرگر FMS نشان‌داده شده است (شکل ۲۹).

**شکستگی القایی**

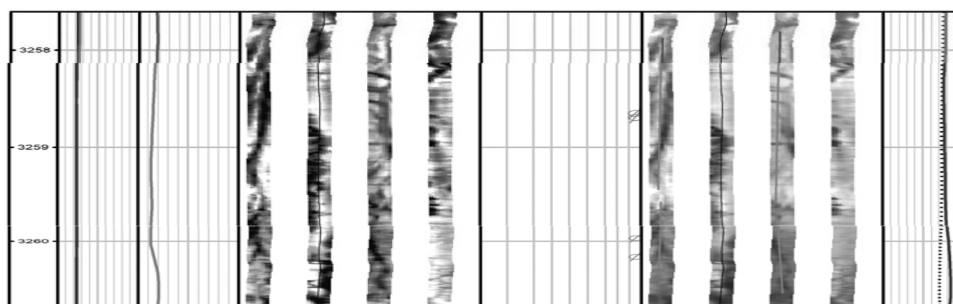
وقتی که وزن گل زیاد باشد مقدار تنشی که گل حفاری در اعماق به دیواره چاه وارد می‌کند بیشتر از تنش بیشینه در آن اعماق است. بنابراین در دو قسمت متقابل دیواره چاه شکستگی کششی به‌وجود می‌آید که شکستگی القایی در اثر حفاری نامیده می‌شود [۳۱]. شکستگی‌های القایی در چاه‌های قائم به‌صورت متقارن در دو طرف چاه و به موازت محور چاه دیده می‌شوند. نمونه‌ای از شکستگی‌های باز شناسایی شده در چاه کلیدی مورد مطالعه برروی نمودار تصویرگر FMS نشان داده شده است (شکل ۳۰).

**شکستگی‌های طبیعی توسعه یافته**

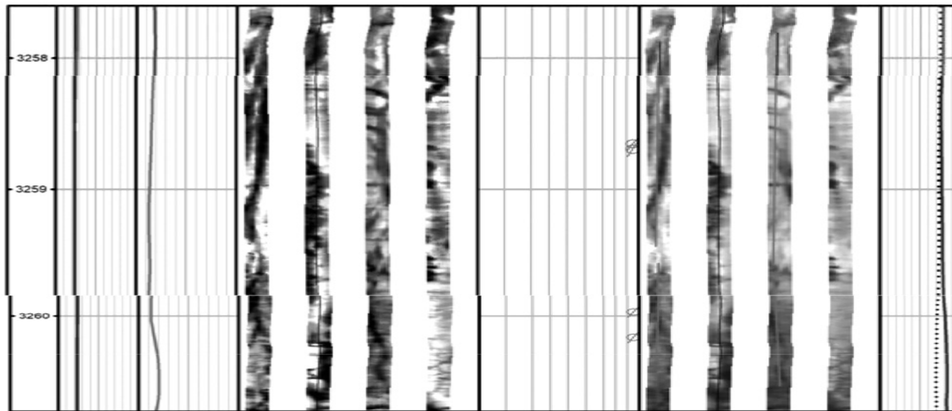
این شکستگی‌ها به‌صورت طبیعی در مخزن وجود دارد و فرآیند حفاری باعث بازتر شدن آن‌ها شده و امکان تشخیص آن‌ها برروی لاگ تصویری فراهم می‌شود [۳۰].




**شکل ۲۸** تعدادی از رگچه‌های انحلالی چاه مورد مطالعه برروی لاگ تصویرگر FMS




**شکل ۲۹** تعدادی از شکستگی‌های باز شناسایی شده چاه مورد مطالعه برروی لاگ تصویری FMS



**شکل ۳۰** تعدادی از شکستگی‌های القایی شناسایی شده چاه مورد مطالعه برروی لاگ تصویری FMS

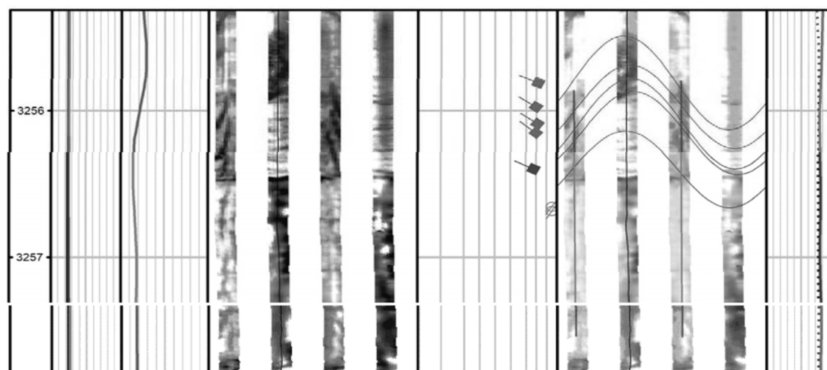
تعدادی از شکستگی‌های طبیعی توسعه یافته در اثر حفاری که با موج سینوسی برروی نمودار FMS مشخص شده، نشان داده شده است (شکل ۳۱)

**ریزش متقارن**

ریزش‌های متقارن[1] هنگامی ایجاد می‌شوند که تنش‌های اطراف دیواره چاه از مقاومت فشارشی سنگ فزونی یابد [۳۲]. ریزش‌های متقارن در راستای عمود بر تنش افقی بیشینه ایجاد می‌شوند. هنگامی‌که یک چاه حفاری می‌شود دیگر سنگی در آن محل وجود ندارد که تنش را تحمل کند، بنابراین تنش به سنگ‌های اطراف منتقل می‌شود [۳۰]. نمونه‌ای از ریزش متقارن دیواره چاه برروی نمودار تصویرگر FMS نشان داده شده است (شکل ۳۲).

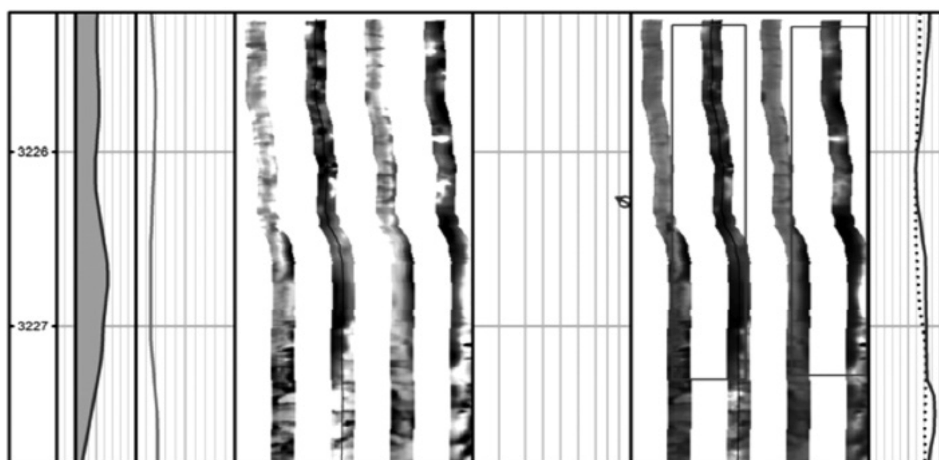
**چینه‌بندی متقاطع**

چینه‌بندی متقاطع با لایه‌بندی چلیپایی به نوعی ساختار لایه ای گفته می‌شود که حاصل از نهشته شدن لایه‌های مورب به‌صورت سطح شیب‌دار باشد. چینه‌بندی متقاطع یک نوع لایه‌بندی با مقیاس کوچک‌تر است که به‌طور غالب ضخامت آن‌ها کم است و نسبت به طبقه‌بندی اصلی به حالت متقاطع قرار گرفته‌اند. چینه‌بندی متقاطع نتیجه محیط ویژه‌ای از رسوب‌گذاری است و نه تغییر شکل هندسی سنگ بر اثر تنش [۳۰]. در لاگ تصویرگر، چینه‌بندی‌های متقاطع، با تغییرات ناگهانی (و به‌صورت عمود بر هم) درشیب لایه‌ها شناسایی می‌شوند. جهت شیب چینه‌بندی های متقاطع به‌طور غالب به‌سمت شمال می باشد. نمونه ای از چینه‌بندی متقاطع چاه کلیدی مورد مطالعه برروی نمودار FMS نشان داده شده است (شکل ۳۳).

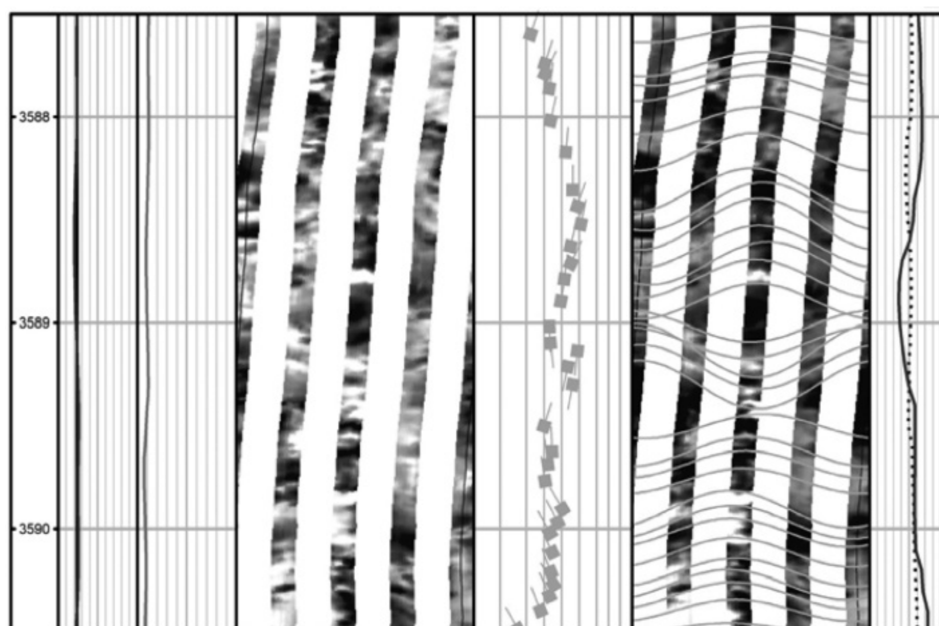


**شکل ۳۱** نمونه‌ای از شکستگی‌های طبیعی توسعه یافته در اثر حفاری به‌همراه شکستگی‌های القایی در چاه مورد مطالعه برروی نمودار FMS

1. Breakout




**شکل ۳۲** یک جفت از ریزش‌های متقارن دیواره چاه برروی نمودار FMS




**شکل ۳۳** نمونه‌ای از چینه‌بندی‌های متقاطع چاه مورد مطالعه برروی نمودار FMS

## نتیجه‌گیری

• مطالعات پتروگرافی سازند شوریجه نشان می‌دهد که شرایط آب و هوایی منطقه در زمان رسوب‌گذاری این ذرات نیمه خشک تا مرطوب بوده است.

• براساس بررسی‌های پتروگرافی برروی مقاطع نازک سازند شوریجه در چاه‌های مورد مطالعه، ۹ رخساره سنگی اصلی شامل کنگلومرای ماسه‌ای، کوارتز آرنایت، ساب لیتارنایت، ساب آرکوز، کوارتز وک، رس‌سنگ/ شیل، انیدریت نودولار، دولومادستون ماسه‌ای و دولوگرینستون ماسه‌ای شناسایی گردیده است که در پهنه‌های جزر و مدی، رودخانه‌ای، دشت سیلابی و رسوبی مئاندری قرار گرفته اند.

• بخش عمده توالی سازند شوریجه در زون‌های B و D چاه‌های مورد مطالعه میدان خانگیران، به‌ویژه در بخش‌های شرق و جنوب شرقی آن، از پتروفاسیس‌های ماسه‌سنگ و میکروکنگلومرا تا ماسه گراولی تشکیل شده است که بیانگر تشکیل این رخساره‌ها در رودخانه‌های بریده بریده و مئاندری می‌باشد. بخش میانی توالی سازند شوریجه (زون C) نیز به‌نظر می‌رسد در بخش پر انرژی کولاب تا

سدهای جزر و مدی گسترش پیدا کرده است. در ادامه، بخش‌های A و E به‌طور عمده در محیط دشت سیلابی تا پهنه جزر و مدی نهشته شده‌اند.

• بررسی‌های پتروگرافی نشان می‌دهد که فرآیندهای دیاژنتیکی این سنگ‌ها را در سه مرحله دیاژنز آغازین، دفنی و بالاآمدگی تحت تاثیر قرار داده است. مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی تأثیرگذار در سازند شوریجه شامل آشفتگی زیستی، سیمانی‌شدن (سیلیسی، کلسیتی، دولومیتی، هماتیتی و انیدریتی)، تراکم و تخلخل می‌باشند. سیمان‌های کلسیتی و دولومیتی در سازند شوریجه، اصلی‌ترین سیمان کربناته بوده و از مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی کاهش‌دهنده تخلخل در این سازند محسوب می‌شوند.

• براساس مطالعات پتروگرافی انجام شده تخلخل در ماسه سنگ‌های سازند شوریجه از نوع اولیه (بین دانه‌ای) و ثانویه (انحلالی) می‌باشد. تخلخل بیشتر در رخساره‌های دانه درشت سازند رواج دارد.

• نتایج حاصل از ارزیابی پتروفیزیکی برای سازند شوریجه در چاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد از نظر ترکیب کانی‌شناسی، سازند شوریجه به‌طور عمده از کانی‌های کوارتز، کلسیت، دولومیت و انیدریت تشکیل شده است.

• براساس توزیع فرآیندهای دیاژنز و رخساره‌ها در امتداد توالی چاه‌های مورد مطالعه در سازند شوریجه، زون B با ظهور و غلبه رخساره‌های ماسه‌سنگی و وجود میکروکنگلومرا در قاعده این زون و فرآیندهای دیاژنتیکی با تأثیر مثبت مانند تخلخل و شکستگی دارای خصوصیات مخزنی است. همچنین زون D نیز به دلیل وجود رخساره‌های ماسه‌سنگی و دولومیتی‌شدن دارای خصوصیات مخزنی خوب است.

• براساس محاسبات و تغییرات پارامترهای پتروفیزیکی و تلفیق این نتایج با مطالعات پتروگرافی زون B و D با ظهور و غلبه رخساره‌های ماسه‌سنگی با خصوصیات مخزنی خوب مشخص است.

• تراکم پدیده‌های حاصل از انحلال فشاری (رگچه‌های انحلالی و استیلولیت‌ها) در چاه کلیدی مورد مطالعه بسیار زیاد می‌باشد. تراکم زیاد استیلولیت و رگچه‌های انحلالی در مخزن می‌تواند تراوایی عمودی را کاهش دهد.

• در اکثر موارد انطباق خوبی بین مطالعات حاصل از مقاطع نازک، نمودار پتروفیزیکی و نمودارهای تصویرگر وجود دارد.

## مراجع

[1]. Lyberis N, Manby G (1999) Oblique to orthogonal convergence across the Turan Block in the PostMiocene, AAPG Bulletin, 83, 7: 1135-1160.

[۲]. کدخدایی ع، تقوی م (۱۳۹۷) گزارش رسوب‌شناسی سازند شوریجه در میدان گازی خانگیران، شرکت نفت مناطق-مرکزی ایران، شرکت خدمات مهندسی نفت کیش، ۴۹ -۱.

[3]. Robert A M, Letouzey J, Kavoosi M A, Sherkati S, Müller C, Vergés J, Aghababaei A (2014) Structural evolution of the Kopeh Dagh fold-and-thrust belt (NE Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin, Marine and Petroleum Geology, 57: 68-87.

[۴]. تقوی م (۱۳۹۷) گزارش مطالعه به روز رسانی میدان گازی خانگیران، شرکت نفت مناطق مرکزی ایران، شرکت خدمات مهندسی نفت کیش، ۵۲-۱.

[5]. Afshar- Harab A (1979) The stratigraphy, tectonic and petroleum geology of Kopeh Dagh region, Northern Iran, Ph.D. thesis, Petroleum geology of Iran, Royal School of Mines, Imperial College, London, 316.

[۶]. نداف ـ کهنه قوچان ر، نجفی م، موسوی ـ حرمی ر (۱۳۷۷) مطالعات لیتواستراتیگرافی و پتروگرافی سازند شوریجه در دره رادکان بارو واقع در جنوب شرق قوچان و مقایسه آن با مقاطع چشمه گیلاس. دره خور و گردنه مزدوران، رساله دکتری، وزارت علوم، تحقیقات و فن‌آوری، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

[۷]. طباطبایی پ، لاسمی ی، جهانی د، اصیلیان ـ مهابادی ح (۱۳۹۲) رخساره‌ها و محیط‌های رسوبی سازند شوریجه در برش‌های قرقره و خانگیران، خاور حوضه رسوبی کپه داغ، ماهنامه اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۹۲، ۱۰۴: ۷۸- ۷۲.

[۸]. مرتضوی ـ مهریزی م، موسوی ـ حرمی ر، محبوبی ا، نجفی م، قایمی ف (۱۳۹۲) بررسی رخساره‌های سنگی، تاریخچه رسوب‌گذاری و پس از رسوب‌گذاری و چینه‌نگاری سکانسی سازند شوریجه (کرتاسه تحتانی) در بخش مرکزی و غربی حوضه رسوبی کپه داغ، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، رساله دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

[۹]. منصوری هفشجانی م، رحیم‌پور- بناب ح، توکلی و (۱۳۹۳) کاربرد نمودار ریز تصویرگر سازند دالان در شناسایی رخساره‌های رسوبی و پدیده‌های دیاژنزی در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب ایران، نشریه علمی پژوهشی رخساره‌های رسوبی، ۲،۷: ۲۸۶- ۲۶۸.

[10]. Miall AD (2014) The geology of fluvial deposits sedimentary facies basin analysis and petroleum geology, Published by Springer-Verlag, 582.

[11] Tucker M E (2001) Sedimentary petrology, blackwell scientific publications, Oxford, Geological Magazine, 01, 139: 97- 104.

[۱۲]. حسین‌یار غ ر، موسوی حرمی ر، عبدالهی‌فرد ا، محبوبی ا، مصفی ح ر (۱۳۹۷) شناسایی دسته رخساره FSST در توالی‌های رودخانه‌ای با مثالی از سازند شوریجه، علوم زمین، ۹۷، ۱۱۳: ۲۸۳- ۲۹۰.

[13]. Nichols G (2009) Sedimentology and stratigraphy, 10:1405135921, Blackwell Science Ltd, London,1- 335.

[14]. Pemberton S G, Gingras M K (2005) Classification and characterizations of biogenically enhanced permeability, American Association of Petroleum Geologists Bulletin,5, 89: 1493-1517.

[15]. Moore C H, Wade W J (2013) Carbonate reservoirs: Porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework, Newnes.

[16]. Barclay S A, Worden R H (2000) Effects of reservoir wettability on quartz cementation in oil fields, Quartz Cementation in Sandstones, 29: 103-117.

[17]. Walderhaug O (1994) Precipitation rates for quartz cement in sandstones determined by fluid-inclusion microthermometry and temperature-history modeling, Journal of Sedimentary Research, 64, 2a: 324–333.

[18]. Bjorlykke K, Egeberg P k, (1993) Quartz cementation in sedimentary Basins, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 77, 9: 1518- 1538.

[19]. Moussavi-Harami R, Brenner R (1992) Geohistory analysis and petroleum reservoir characteristics of lower cretaceous (Neocomian) sandstones, eastern Kopet Dagh basin, Northeastern Iran, Bulletin of the American As-Sociation of Petroleum Geologists, 92, 76: 1200-1208.

[20]. Hendry J P (1993) Calcite cementation during bacterial manganese, iron and sulphate reduction in Jurassic shallow marine carbonates, Blackwell Publishing Ltd, 87-106.

[21]. Nordahl K, Ringrose PS (2008) Identifying the representative elementary volume for permeability in heterolithic deposits using numerical rock models, Mathematical Geosciences, 40, 7: 753-771.

[22]. Hubert J F, Reed A A (1978) Red-bed diagenesis in the East Berlin formation, Newark Group, Connecticut Valley, Journal of Sedimentary Petrology, 48, 1: 175–184.

[۲۳]. اسعدی ع، شاکری ع ر، کدخدایی ع، رحیم پور- بناب ح، چهرازی ع (۱۳۹۵) تاثیر کانی‌زایی انیدریت بر کیفیت مخزنی دولومیت‌های سازند عرب: مطالعه موردی در یکی از میادین هیدروکربنی خلیج‌فارس، پژوهش نفت، ۲۶، ۴: ۲۴-۱۳.

[۲۴]. فیض‌نیا س (۱۳۸۸) سنگ‌های رسوبی کربناته، دیاژنز کربنات‌ها، ۹ف۴ک/۴۷۱/۱۵، انتشارات آستان قدس رضوی، ۲۶۱-۲۰۶.

[25]. Barbier M, Lepretre R, Callot J P, Gasparrini M, Daniel J M, Hamon Y, Lacombe O, Floquet M (2012) Impact of fracture stratigraphy on the paleo-hydrogeology of the madison limestonein two basement-involved folds in the Bighorn basin (Wyoming, USA), Elsevier Journal, 567- 577, 5: 116- 132.

[26]. Love L G (1967) Early diagenetic iron sulphide in recent sediments of the Wash England, Geology Sedimentology, 9, 4: 265-361.

[27]. Elmore R D, Engel M, Crawford L, Nick K, Imbus S, Sofer, Z (1987) Evidence for a relationshipbetween hydrocarbons and authigenic magnetite, Nature, 325, 119: 428-430.

[۲۸]. کدخدایی ع (۱۴۰۰) گزارش مطالعه تلفیقی نوع منافذ با استفاده از نمودارهای تصویری، نمودار انحراف سرعت و تجزیه طیفی نمودار صوتی، شرکت نفت مناطق مرکزی ایران، شرکت خدمات مهندسی نفت کیش، ۷۰-۱.

[۲۹]. کدخدایی ع (۱۳۹۷) ارزیابی سازندهای نفت دار، ۹۷۸۶۰۰۷۱۱۱۶۸۰، انتشارات دایره دانش، ۴۴۲- ۳۹۹.

[۳۰]. تقوی م (۱۳۹۷) گزارش مطالعات نمودارهای تصویرگر، شرکت نفت مناطق مرکزی ایران، شرکت خدمات مهندسی نفت کیش، ۱۰۳ -۱.

[31]. Movahed Z, Dashti R, Chakravorty S (2007) Geological and petrophysical analysis of FuII Bore Formation Micro Imager (FMI), Feild Ahvaz, Well No.383. Well Services of Iran (Schlumberger Methods), Report No. 5627: 1-64.

[32]. Serra O (1989) Formation microscanner image interpretation, Schlumberger Educational Service, Houston, 117.

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۷۶-۶۰

# تجزیه و تحلیل رخساره‌ای، محیط رسوبی و فرآیندهای دیاژنتیکی سازند ایلام میدان گچساران، حوضه زاگرس

**مهدی احمدی نبی[1]، داوود جهانی[1] و بهمن سلیمانی[2]***

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی و حوضه‌های رسوبی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

## چکیده

بررسی ویژگی‌های رسوبی سازندهای کربناته به‌عنوان یکی از مخازن عمده ذخیره‌سازی هیدروکربن، اهمیت بالایی دارد. به‌منظور تجزیه و تحلیل رخساره‌ای، محیط رسوبی، و تغییرات دیاژنزی سازند ایلام (گروه بنگستان) در میدان گچساران از داده‌های مقاطع نازک، و نمودارهای چاه‌پیمایی (لاگ) استفاده شده است. مطالعات پتروگرافی نشان داد این سازند منحصراً در بخش غربی گسترش داشته، و با یک منطقه زیستی حاوی رخساره نریتیک ناحیه کم عمق دریا، مشخص می‌گردد. رخساره‌های رسوبی این سازند عمدتاً آهکی که گاهی (بسته به عمق حوضه رسوبی) به آهک شیلی تغییر می‌نماید. در چاه‌های بخش شرقی میدان گچساران، نبود عظیمی از رسوبات کنیاسین و تورونین مشاهده شد که علت آن تاثیر فاز فرسایشی بعد از سنومانین– تورونین و ایجاد ارتفاعات قدیمی به موازات گسل خارک-میش است. رخساره‌های تعیین شده برروی یک پلاتفرم کربناته (شلف)، در سه محیط لاگون، پشته (شول) و لاگون دریای باز نهشته شده‌اند. رخساره‌های سازند ایلام محیط‌های مختلف دیاژنزی دریایی، متئوریک، دفنی و نیز بالا آمدگی را تجربه نموده‌اند. این رسوبات در معرض فرآیندهای میکریتی شدن، فشردگی، سیمانی شدن، نئومورفیسم، انحلال، شکستگی و جانشینی (دولومیتی شدن، هماتیتی شدن و پیریتی شدن) قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین انواع تخلخل شامل حفره‌ای مرتبط، شکستگی و کانالی هستند، که نقش زیادی در تغییرات کیفیت مخزن داشته‌اند. بررسی مقادیر پارامترهای پتروفیزیکی نشان داد که میانگین تخلخل، اشباع آب و نسبت ضخامت مفید به کل متغییر بوده ولی به‌طور کلی به‌ترتیب ۲/۳٪، ۸۸٪ و ۰/۰۱۶ است. با توجه به پایین بودن میزان تخلخل، نقش شکستگی، و سایر فرآیندهای دیاژنزی در کیفیت مخزن قابل توجه است. فعالیت بلندی قدیمی در بخش شرقی نه تنها در توزیع رخساره‌ای محسوس است بلکه نقش عمده‌ای در تحولات بعدی سازند ایلام دارد. بنابراین کیفیت مخزنی سازند ایلام تابع عوامل متعدد رسوبی، دیاژنژی، و فعالیت تکتونیکی بوده، و لذا در بخش‌های مختلف متغییر خواهد بود.

**کلمات کلیدی: میدان گچساران، سازند ایلام، نمودار چاه‌پیمایی، رخساره رسوبی، کیفیت مخزن**

---

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی soleimani_b@scu.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4456.3016)

**مقدمه**

آنالیز رخساره‌ای در اکتشاف و توسعه مخازن هیدروکربنی در سنگ‌های کربناته اهمیت بالایی دارد [۱]. کیفیت سنگ مخزن می‌تواند متأثر از شرایط رسوبی یا نوع رخساره‌رسوبی و فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر آن باشد [۲]. در مخازن هیدروکربنی، انواع مرتبط با سطوح ناپیوستگی، ۲۰ تا ۳۰٪ از کل ذخایر هیدروکربوری را شامل می‌شوند [۳]. تأثیر شرایط و فرآیندهای دیاژنز جوی (ائوژنتیک/ تلوژنتیک) بر بیرون زدگی‌ها، در حفظ، گسترش و یا تخریب تخلخل در این‌گونه مخازن با اهمیت است [۴-۵]. سیستم حفرات در طول زمان رخنمون، تحت شرایط جوی قرار می‌گیرند و دوره‌های کوتاه‌تر رخنمون در مقایسه با دوره‌های طولانی‌تر، افزایش بیشتر تخلخل و بهبود کیفیت مخزنی را موجب می‌شوند [۳]. تاکنون نظرات مختلفی در مورد مرز ناپیوستگی سنومانین فوقانی تا پایان تورونین در فروافتادگی دزفول ارائه شده است: در بالای منطقه زیستی ۲۹ [۶-۸]، در زیر منطقه زیستی ۲۹ [۹-۱۰]، به‌صورت دو ناپیوستگی [۱۱-۱۲] و یا یک ناپیوستگی اصلی در میانه منطقه زیستی ۲۹ [۱۳-۱۴]. نوشته‌ها و مقالات زیادی درخصوص سازند ایلام وجود دارد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: وزیری مقدم [۱۵] زیست چینه‌نگاری سازند ایلام را در جنوب‌شرقی شیراز مطالعه کرده و در آن دو منطقه زیستی براساس فرامینیفرهای پلانکتون تشخیص داده است. وزیری مقدم و صفری [۱۶] میکروفاسیس و محیط رسوبی سازند را در منطقه سمیرم مطالعه و سن سازند ایلام را سانتونین و مدل رسوبی آن را فلات کربناته از نوع رمپ و سرمدی و همکاران [۱۷] محیط شول و دریای باز را برای آن در میدان نفتی سعادت‌آباد در نظر گرفته‌اند. هر چند براساس موقعیت سازند در حوضه زاگرس سن‌های مختلفی از جمله تورونین-کامپانین (شاهین [۱۸] در میادین مشترک ایران-عراق)، کنیاسین-سانتونین (خدایی و همکاران [۱۴] در ناحیه آبادان) و سانتونین (خسرو تهرانی و همکاران [۱۹] در کوه عسلویه) بیان شده است. سپیانی و همکاران [۲۰] پتروگرافی و تاریخچه رسوب‌گذاری سازند ایلام در چاه‌های شماره ۱ و ۴ میدان نفتی ماله کوه (شمال باختری اندیمشک) را مورد بررسی قرار دادند. اسدی مهمان‌دوستی [۲۱] و اسدی مهمان‌دوستی و همکاران [۲۲-۲۳] به بررسی ژئوشیمی، محیط رسوبی و دیاژنز سازند ایلام پرداخته‌اند. چهارده چریک [۲۴] زیست چینه‌نگاری سازند ایلام) مقطع تیپ (را براساس فرامینیفرهای پلانکتونیک، جنوب¬غرب ایلام مورد بررسی قرار داد. ریخته‌گرزاده و همکاران [۲۵] در مطالعه ریز چینه‌ای سازند سروک و ایلام در چاه ۳۳۵ در میدان گچساران، ۵ زیر رخساره در سازند ایلام تعیین نمودند. مهرابی و همکاران [۲۶] محیط رسوبی و سکانس چینه‌ای سازند ایلام در فروافتادگی دزفول را مطالعه نمودند. مدل‌سازی سازند ایلام در میادین نفتی جنوب‌غرب ایران توسط محققین مختلفی مطالعه شده است (مانند [۲۷-۲۸]). با بررسی پیشینه مطالعاتی، به‌نظر می‌رسد ارزیابی تکمیلی این سازند و تغییرات لیتولوژیکی آن، نیازمند بررسی و توجه به نقش تکتونیک در پتانسیل هیدروکربنی این سازند [۲۹-۳۰] و نیز استفاده از داده‌های حاصل از چاه‌های حفاری جدید است. مقاله کنونی تلاش می‌نماید که با آنالیز رخساره رسوبی و بررسی فرآیندهای مختلف دیاژنزی سازند ایلام در میدان گچساران با توجه به داده‌های چاه‌های حفاری جدید، تفسیر جدید و مدل رسوبی مناسبی را ارائه نماید.

**موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه**

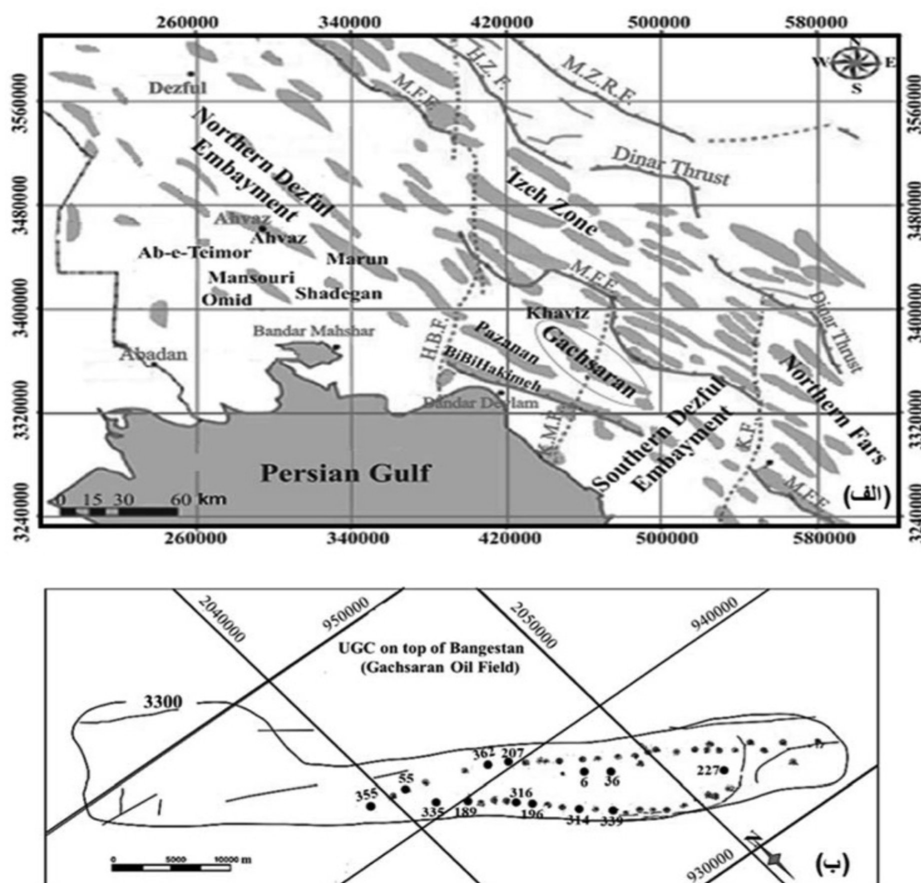
میدان گچساران در ۵ km جنوب غربی شهرستان گچساران و ۲۰۰ km جنوب شرق شهرستان اهواز قرار دارد. این میدان از نظر ساختمان، تاقدیسی کشیده و نامتقارن با محوری در جهت شمال غرب جنوب شرق به طول ۶۳ km و عرض ۶ تا ۱۲ km است. میدان گچساران به‌دلیل مجاورت و انضمام تاقدیس نسبتاً کوچک و ساده‌ای به‌نام لیشتر در

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۷۶-۶۰

دماغه غربی آن، گچساران ـ لیشتر نامیده می‌شود. این میدان و رخنمون‌های اطراف از نظر ژئومتری و هندسه رسوبی، تحت تأثیر ساختار خطی خارک ـ میش قرار گرفته است. تاقدیس میش در فاصله ۱۷ km شرق دو گنبدان (گچساران) و از نظر زمین‌شناسی در منطقه ایذه در کمربند ساده چین‌خورده زاگرس قرار دارد (شکل ۱).

## روش و ابزارهای مورد استفاده

در این مطالعه جهت بررسی پتروگرافی و همچنین تعیین و تفکیک رخساره‌های رسوبی، بررسی فرآیندهای دیاژنزی و تفسیر کیفیت مخزنی هر رخساره، از مقاطع نازک، داده‌های مغزه، و نمودارهای چاه پیمایی استفاده گردید. با بررسی تعداد ۱۳۱۴ مقطع نازک (شامل ۴۶۵ مقطع نازک از نمونه‌های مغزه و ۸۴۹ مقطع نازک تهیه شده کنده‌های حفاری) مربوط به مخزن بنگستان، به‌دلیل ضخامت محدود سازند ایلام و نیز نبود آن در بعضی از چاه‌های حفاری شده، تعداد ۲۰۰ مقطع نازک مربوط به سازند ایلام تفکیک و توسط میکروسکوپ پلاریزان مورد بررسی قرار گرفت. مجموع طول مغزه در چاه‌های مورد مطالعه ۱۲۵ m از چاه‌های ۳۵۵، ۳۶۲، و ۳۱۶ بود. در این مطالعه، در طبقه‌بندی سنگ‌ها از روش دانهام [۳۲]؛ در تفسیر ریزرخساره‌ها از مدل‌های شلاگر [۳۳] و فلوگل [۱]؛ در شناسایی تخلخل از طبقه‌بندی چوکت و پری [۳۴] استفاده گردید. با توجه به عدم امکان رنگ‌آمیزی مقاطع، شناسایی انواع تخلخل در میکروسکوپ با کمک تیغه ژیپس و چسب اپوکسی با رنگ آبی انجام گرفت. به‌منظور اصلاح منطقه‌بندی مخزن بنگستان (سازندهای ایلام و سروک)، از نمودارهای چاه‌پیمایی (مانند گاما، نوترون، دانسیته) و همچنین نرم‌افزار سیکلولاگ نیز استفاده شد.




**شکل ۱** الف) نقشه موقعیت میدان گچساران و میادین همجوار [۳۱] و ب) موقعیت چاه‌های مورد مطالعه

از مهم‌ترین نمودارهای به‌کار گرفته شده می‌توان به گامای تصحیح شده[1]، تخلخل نوترون، چگالی، مقاومت، نمودار تخلخل مؤثر[2] و نمودار اشباع شدگی آب مؤثر[3] اشاره کرد. در این پژوهش، رخساره‌های سازند ایلام در ۹ حلقه چاه میدان گچساران مورد مطالعه قرار گرفت. در این راستا، ارزیابی محیط رسوبی توسط معیارهای رسوبی و پالئواکولوژیکی انجام شد.

## بحث

### آنالیز رخساره‌ای سازند ایلام در میدان گچساران

با توجه به بررسی‌های به‌عمل آمده در زمینه توزیع رخساره‌های رسوبی سازند ایلام در چاه‌های مورد مطالعه این میدان آشکار شد که این سازند تنها در بخش غربی میدان مشاهده می‌شود ولی به‌سمت شرق میدان به‌واسطه وجود بلندی‌های دیرین، تحت تأثیر فرسایش و یا نبود رسوب‌گذاری قرار گرفته است. رخساره غالب سازند ایلام در بخش‌های کم عمق‌تر پلاتفرم کربناته در محیط‌های شول، لاگون مرتبط با دریای باز و لاگون محدود، تشکیل شده است.

مطالعات رخساره‌ای انجام گرفته منجر به شناسایی تعداد ۵ ریزرخساره (جدول ۱ و شکل ۲) در سازند ایلام شده که این ریزرخساره‌ها در ۲ کمربند رخساره اصلی (شامل: ۱-شول؛ ۲-لاگون‌های محدود شده و دارای ارتباط با دریای باز) نهشته شده‌اند.

#### ریزرخساره‌های شول یا پشته‌های زیرآبی[4]

**ریزرخساره شماره ۱- گرینستون:** این ریزرخساره (شکل ۲ الف)، از فرامینیفرای کفزی با فراوانی بسیار زیاد (نظیر آلوئولینیدا، نزازاتا، میلیولیدا و غیره)، خرده‌های رودیست و بایوکلاست‌ها (عمدتاً میکرایتی شده) و پلوئید است. فراوانی فرامینیفرهای بنتیک (اغلب میکرایتی شده) به حدی است که می‌توان در برخی موارد آن را بنتیک فرام گرینستون نامید. فابریک رسوبی نظیر جورشدگی خوب اجزاء بیانگر انرژی بالای محیط رسوب‌گذاری بوده و با توجه به این توضیحات، این ریزرخساره به بخش شول خصوصاً به‌سمت لاگون[5] نسبت داده می‌شود.

#### ریزرخساره‌های لاگون محدود شده و دریای باز[6]

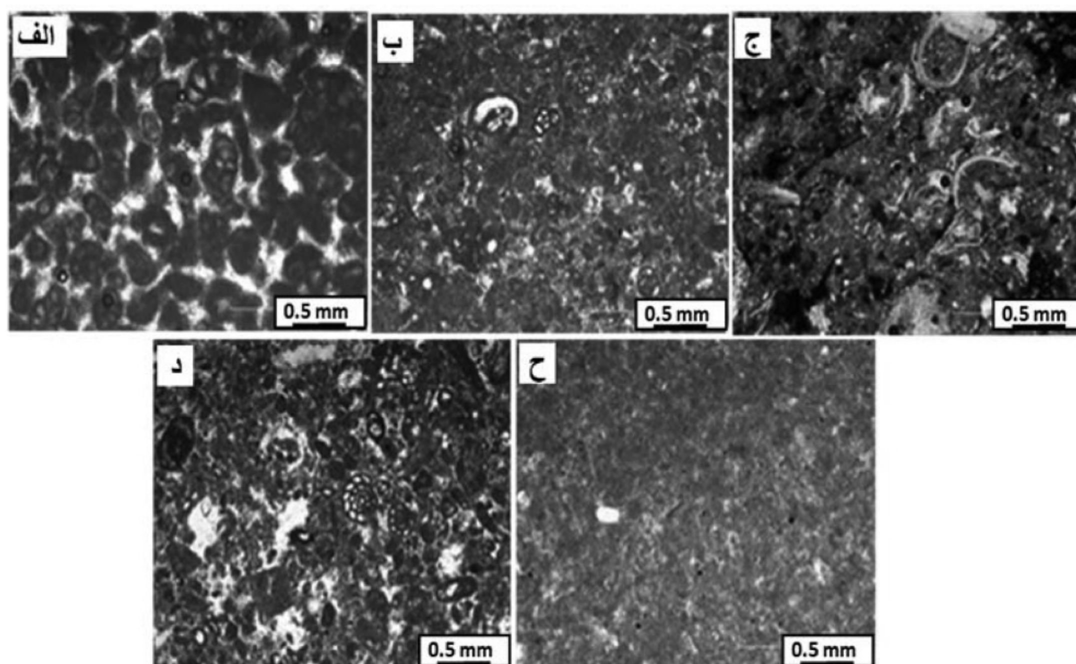
**ریزرخساره شماره ۲- وکستون حاوی خرده‌های رودیست و فرامینیفرای بزرگ:** این ریزرخساره (شکل ۲ ب) شامل فرامینیفرهای کفزی بزرگ از قبیل آلوئولینیدا، میلیولیدا و نزازاتا و خرده‌های کوچک رودیست و پلوئید در زمینه‌ای میکریتی است. پدیده میکرایتی شدن در برخی بایوکلاست‌ها دیده می‌شود. این ریزرخساره معادل RMF16 فلوگل [۲۱] (مادستون- وکستون دارای میلیولید) است.

**جدول ۱** ریزرخساره‌های مشاهده شده سازند ایلام

| محیط رسوبی | توصیف | رخساره |
|---|---|---|
| شول | گرین استون-فرامینیفر بنتیک (BF)، پلوئیدها | MF 1 |
| لاگون | وکستون-بیوکلاست (رودیست، دوکفه‌ای، فقدان فرامینیفر بنتیک) | MF 2 |
| لاگون | مادستون-وکستون، فرامینیفر بنتیک (والوئولینا، نزازاتا، ....)-بیوکلاست (خرده رودیست) | MF 3 |
| لاگون | پکستون دارای فرامینیفر بنتیک + خرده صدف | MF 4 |
| لاگون-نیمه محدود | مادستون (فرامینیفر بنتیک نظیر میلیولیده، نزازاتا، ....) | MF 5 |

1. CGR=Corrected Gamma Ray
2. PHIE
3. SWE
4. Shoals
5. Back Shoal
6. Open Marine lagoon

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۷۶-۶۰



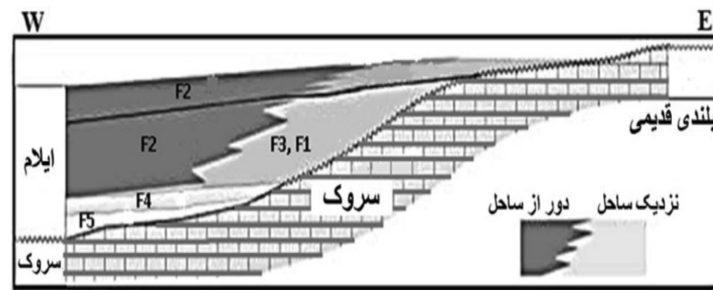

**شکل ۲** تصاویر میکروسکوپی از ریز رخساره‌های شناسایی شده شامل: الف-گرینستون (MF1)؛ ب- وکستون حاوی خرده‌های رودیست و فرامینیفرای بزرگ و دارای پلوئید (MF2)؛ ج- وکستون و مادستون حاوی قطعات جلبک و فرامینیفرای بنتیک (MF3)؛ د- وکستون و پکستون حاوی قطعات جلبک و فرامینیفرای بنتیک (MF4)؛ ح- مادستون با فونای لاگون محدود (MF5)، در چاه‌های ۳۳۵ و ۳۵۲ و ۳۱۶ میدان گچساران

ریزرخساره شماره ۳- وکستون و مادستون حاوی قطعات جلبک و فرامینیفرای بنتیک: قطعات جلبک سبز، فرامینیفرای کفزی مانند نزازاتا، میلیولیدا، آلوئولینیدا و خرده‌های رودیست و اویستر از آلوکم‌های غالب این ریزرخساره (شکل ۲ ج) هستند. با توجه به تنوع فرام‌های کفزی و حضور قطعات جلبک سبز، این ریزرخساره در محیط لاگون محدود با ارتباط اندک با آب‌های آزادتر رسوب‌گذاری شده است. ریزرخساره شماره ۴- وکستون و پکستون حاوی قطعات جلبک و فرامینیفرای بنتیک: قطعات جلبک سبز، فرامینیفرای کفزی مانند نزازاتا، میلیولیدا، آلوئولینیدا و خرده‌های رودیست از آلوکم‌های غالب این ریزرخساره (شکل۲ د) هستند. با توجه به تنوع فرام‌های کفزی و حضور قطعات جلبک سبز، این ریزرخساره در محیط لاگون محدود با ارتباط اندک با آب‌های آزاد نهشته شده است.

ریزرخساره شماره ۵- مادستون با فونای محدود لاگون: این ریزرخساره (شکل ۲ ح) با مقدار کمتر فرامینیفرهای کفزی از قبیل میلیولیدا، آلوئولینیدا و نزازاتا، قطعات دو کفه‌ای در زمینه‌ای گلی مشخص شده، و میلیولیدا بسیار فراوان‌تر از سایر فرامینیفرهای مورد اشاره است. در این ریز رخساره، فرامینیفرها دارای تنوع کمتری نسبت به ریزرخساره قبلی هستند. فراوانی میلیولیدا و فابریک گلی بیانگر محیط لاگون (محدود شده) است.

**محیط و مدل رسوبی سازند ایلام**

توزیع ریز رخساره‌های سازند ایلام همراه با تغییرات محیط رسوبی در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. رسوب‌گذاری در عمق‌های مختلف از دریاچه‌ای-قاره‌ای تا محیط‌های کم‌عمق و نسبتاً عمیق دریای باز صورت گرفته است. محیط دریاچه‌ای شیرین تا لب شور در زمان پایین بودن سطح آب دریا وجود داشته است. پس از آن پسروی آب دریا و خروج از آب، در مناطق فروافتاده تر رخساره‌های آب‌شیرین و لب‌شور رسوب کرده است. با شروع پیشروی و رسوب‌گذاری اولین رسوبات دریایی (F5) منجر به پایه‌گذاری شلف باز شده است.




**شکل ۳** مدل رسوبی مفهومی پیشنهادی برای سازند ایلام در میدان گچساران (F= فاسیس)

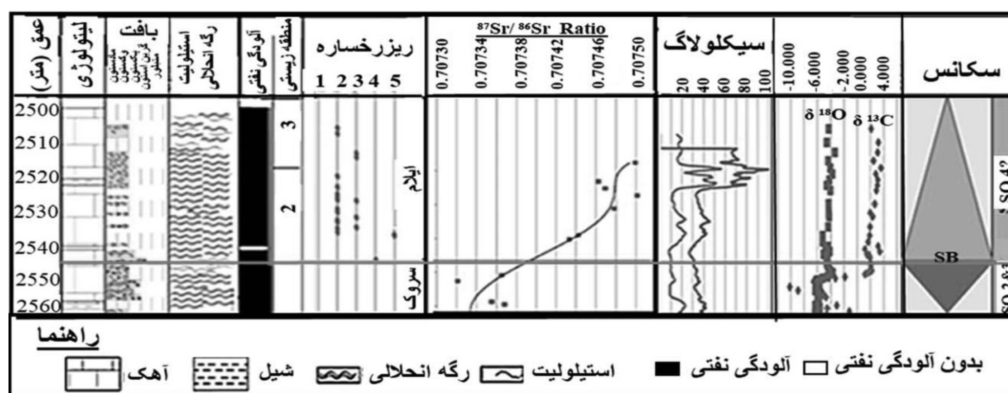
| عمق (متر) | لیتولوژی | رده بندی بافتی (مادستون، وکستون، پکستون، گرین استون، مثلور) | استیلولیت رگه انحلالی | آلودگی نفتی | منطقه زیستی | سن بر اساس زیست چینه ای | دیسکوسیکلینا شلومبرجری | اکینوئید | تزازاتا پیکاردی | رودیست | الیگواستژینا |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۵۰۰ | | | | | ۳ | تورونین- سانتونین | | | | | |
| ۲۵۲۰ | | | | | | | | | | | |
| ۲۵۴۰ | | | | | ۲ | سنومانین بالایی- تورونین | | | | | |
| ۲۵۶۰ | | | | | | | | | | | |

**شکل ۴** نمایش شماتیکی توزیع رخساره‌ها در سازند ایلام در چاه X میدان گچساران

محیط عمیق‌تر با رخساره‌های (F1 و F2) مشخص می‌شود. روند رسوب‌گذاری در سازند ایلام به‌طور کلی حالت پیش‌رونده دارد (شکل ۳). تجزیه و تحلیل رخساره‌ای حاکی از این است که کربنات‌های سازند ایلام در این ناحیه از فروافتادگی دزفول در یک محیط پلاتفرم کربناته از نوع شلف تشکیل شده‌است. در شکل ۵ نیز تغییرات نسبت ایزوتوپی استرانسیم و نمودار سیکلولاگ (در یکی از چاه‌ها) نمایش داده شده است. این پارامترها تطابق خوبی را با تغییرات سکانسی نشان می‌دهند. روند تغییرات نسبت ایزوتوپی $^{87}Sr/^{86}Sr$ به‌سمت راس سازند افزایشی جزئی نسبت به بخش زیرین (سازند سروک) نشان می‌دهد (از ۰/۷۰۷۳ تا ۰/۷۰۷۵). نسبت ایزوتوپی با سن سازند مطابقت داشته [۳۵]، این تغییر افزایشی می‌تواند مربوط به کم عمق شدن حوضه باشد [۳۶]. تغییر قابل ملاحظه این نسبت در عبور از سازند سروک به ایلام مشاهده می‌گردد. روند تغییرات نسبت ایزوتوپی کربن و اکسیژن به‌سمت راس سازند دارای مقادیر مثبت‌تری است یعنی رسوب از ایزوتوپ‌های سبک غنی‌تر است. به‌طوری‌که روندهای افزایشی دما با سبک‌شدن نسبت ایزوتوپ کربن و روندهای کاهشی دما با سنگین‌شدن این نسبت متناسب است؛ باوجوداین، تغییرات نسبت ایزوتوپ کربن به عوامل بسیاری ازجمله تغییرات مواد آلی و آثار زیستی بستگی دارد و به‌سادگی ایزوتوپ اکسیژن نیست [۳۷].

### نقش بلندی‌های قدیمی در توزیع رخساره‌ای سازند ایلام

به‌منظور تفسیر توزیع رخساره‌ای سازند ایلام، ضخامت سازند با استفاده از داده‌های نمودارهای چاه‌پیمایی و نرم‌افزار پترل و همچنین مطالعه ۶ حلقه چاه مغزه دار و در بعضی موارد جهت رفع ابهام جهت تعیین سر سازندها از مقاطع نازک مطالعه گردید.




**شکل ۵** تغییرات نسبت ایزوتوپی استرانسیم، اکسیژن و کربن و نمودار سیکلولاگ در چاه X گچساران [۳۸]

عملکرد بلندی قدیمی خارک ـ میش و توپوگرافی ایجاد شده در حوضه رسوبی میدان گچساران، باعث کاهش ضخامت ایلام در مرکز و حذف آن در بخش شرقی میدان شده است. ضخامت ایلام از ۶۶ m در گچساران ـ ۵۵ (غرب میدان) به ۴۴ m در چاه ـ ۳۶ (مرکز) و به صفر در چاه ـ ۲۲۷ (شرق میدان) کاهش یافته است. محدوده بلندی قدیمی خارک ـ میش در شکل ۶ الف در میدان گچساران و رخنمون‌های اطراف که به‌صورت تغییرات ضخامت سازندها در امتداد یال شمالی در شکل ۶ ج نمایش داده شده است. این تأثیر شامل موارد زیر است.

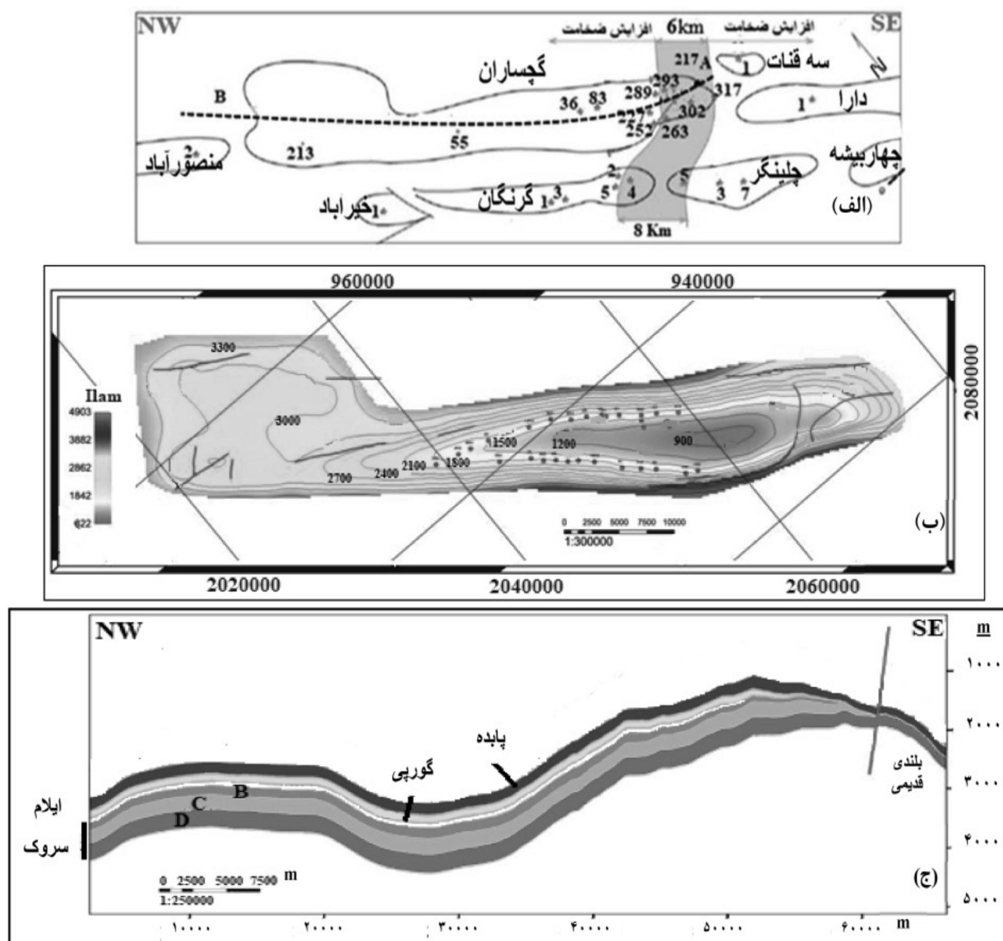
- عدم رسوب‌گذاری ایلام در شرق میدان وکاهش ضخامت آن در بخش‌های مجاور (شکل ۶).
- تأثیر آن برروی سایر سازندها به‌صورت کاهش ضخامت در بخش شرقی میدان. به‌نظر می‌رسد این تأثیر بر رسوب سازند سروک کمتر از سایر سازندها باشد (شکل ۶ ج).
- بخش غربی میدان می‌تواند با بخش شرقی میدان تفاوت کلی داشته باشد (شکل ۶ ب و ۶ ج).

**فرآیندهای دیاژنزی**

سنگ‌های کربناته از نظر اقتصادی اهمیت بسیار زیادی دارند [۳۹]. دیاژنز نقش عمده‌ای را در تخریب تخلخل اولیه و ایجاد تخلخل ثانویه در آنها ایفا می‌کند [۳۹ و ۴۱]. دیاژنز کربنات‌ها در ارتباط با فرآیندهای مختلفی است که در محیط‌های نزدیک به کف دریا، متئوریک و به‌طرف پایین تا محیط دفن عمیق صورت می‌گیرد. این موضوع در ایجاد و تخریب تخلخل در رسوب بسیارحائز اهمیت است [۴۲]. پیش از آغاز دیاژنز تخلخل و تراوایی توسط ترکیب رسوبات و شرایطی که در طول رسوب‌گذاری غالب است کنترل می‌شوند [۴۳]. فرآیندهای دیاژنزی با اعمال تغییرات قابل ملاحظه برروی رسوبات و سنگ‌های میزبان خود، موجب تغییر در سیستم اولیه حفرات شده و توزیع اولیه کیفیت مخزنی را دچار تغییرات اساسی می‌کنند [۲]. به‌طور کلی، دیاژنز به‌میزان قابل توجهی می‌تواند خواص مخزنی سنگ‌های کربناته را تغییر دهد [۴۱]. بنابراین فرآیندهای دیاژنزی در تعیین خصوصیات مخزنی سنگ‌های کربناته اهمیت بالایی دارند. کربنات‌های سازند ایلام در میدان نفتی گچساران تحت تأثیر طیف وسیعی از فرآیندهای دیاژنتیکی قرار گرفته‌اند. این فرآیندها به‌صورت شیمیایی و بیوشیمیایی شامل انحلال، سیمانی شدن، میکریتی‌شدن، استیلولیتی‌شدن، جانشینی دولومیتی‌شدن، هماتیتی شدن و پیریتی شدن، و یا مکانیکی (فیزیکی) شامل فشردگی و شکستگی هستند.

**میکریتی شدن**

میکریتی شدن خرده‌های اسکلتی در کربنات‌های سازند ایلام به‌طور گسترده‌ای مشاهده شده است. میکریتی شدن اولین مرحله دیاژنتیکی است که در دیاژنز دریایی رخ می‌دهد [۴۴].




**شکل ۶** الف) نمایش بالاآمدگی قدیمی خارک میش (بخش قهوه‌ای)، ب) نقشه منحنی همتراز زیرزمینی (U.G.C.) برروی افق ایلام، و ج) برش طولی ساختمانی و تأثیر بلندی قدیمی در ضخامت سازندها در امتداد یال شمالی میدان مورد مطالعه

در سازند ایلام، پوشش‌های میکریتی در اطراف بیوکلاست‌هایی از قبیل فرامینیفرهای بنتیک عمدتاً در رخساره‌های پکستونی و گرینستونی تشکیل شده است (شکل ۷ الف و ۷ ب). در رخساره‌های وکستونی نیز به‌میزان کمی میکریتی شدن اتفاق افتاده است. پوشش‌های میکریتی با ضخامت‌های مختلف و معمولاً در محیط فراتیک دریایی در نزدیکی سطح تماس آب با رسوب تشکیل می‌شوند [۴۵]، این پوشش‌های میکریتی باعث حفظ شکل کلی و مورفولوژی ذرات کربناته می‌شوند [۴۴]. همچنین در مواردی در اثر میکریتی شدن شدید ساختار داخلی، اجزای اسکلتی به‌طور کامل از بین رفته است (شکل ۷ ج).

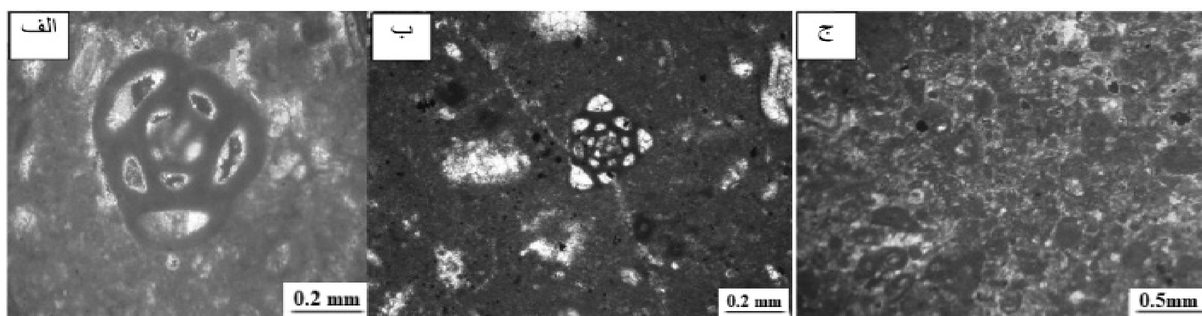
**فشردگی**

یکی دیگر از فرآیندهای دیاژنزی که سازند ایلام را تحت تأثیر قرار داده، فشردگی است. علاوه‌بر عمق تدفین، شدت فشردگی به ترکیب ذرات و نوع مواد پرکننده منافذ بستگی دارد [۴۶].

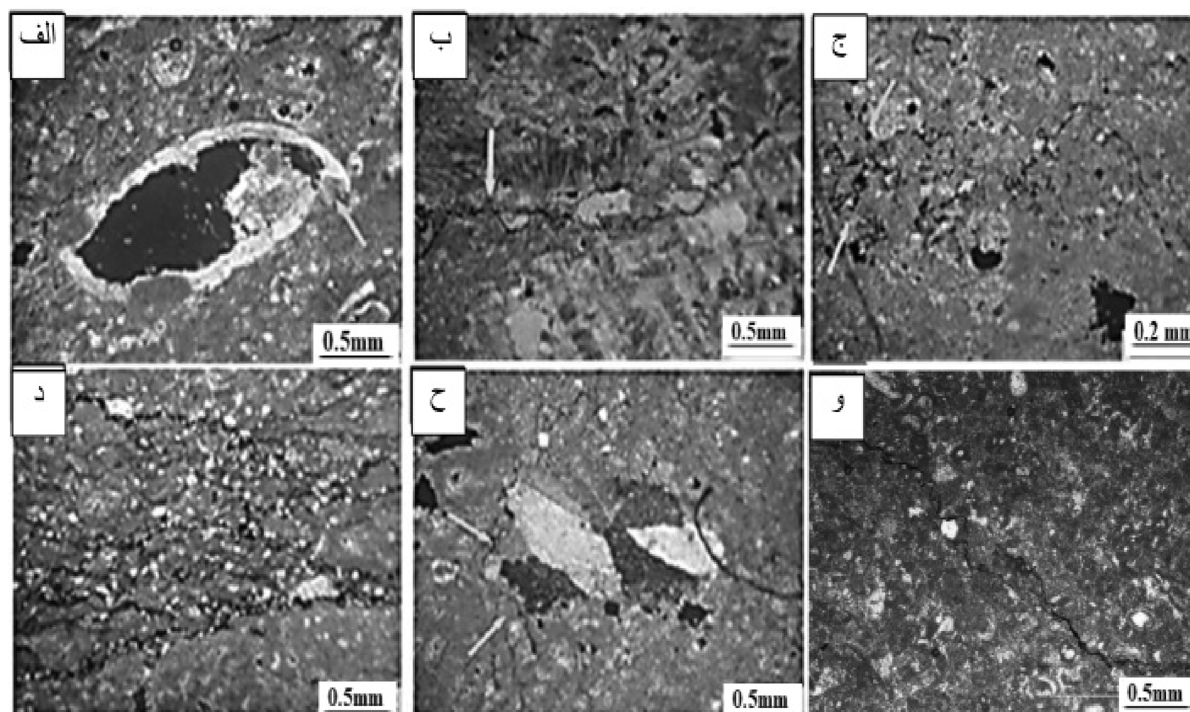
فشردگی به دو صورت فیزیکی و شیمیایی رخ داده است. فشردگی فیزیکی به‌عنوان تغییر شکل پلاستیک ذرات انعطاف‌پذیر [۴۷] و یا به‌صورت شکستگی بعضی از اجزای اسکلتی) مانند پوسته استراکد (شده است (شکل ۸ الف). استیلولیت‌ها اثرات فشردگی شیمیایی هستند که به‌عنوان آرایش نزدیک و تغییر شکل ذرات شناخته می‌شوند [۴۴].

فرآیند استیلولیتی شدن یکی از مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی مؤثر در سازند ایلام بوده و به وفور مشاهده می‌شود. طبق تقسیم‌بندی فلوگل [۱].

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۷۶-۶۰




**شکل ۷** تصاویر میکروسکوپی از تأثیر فرآیند میکریتی شدن در کربنات‌های سازند ایلام: الف- تشکیل پوشش میکریتی در اطراف میلیولید در رخساره وکستون؛ ب- تشکیل پوشش میکریتی در اطراف فرامینیفر بنتیک در رخساره وکستونی؛ ج- میکریتی شدن پلوئیدها در رخساره پکستون پلوئیدی.




**شکل ۸** تصاویر میکروسکوپی تأثیر فرآیند فشردگی فیزیکی و شیمیایی در کربنات‌های سازند ایلام: الف- شکستگی پوسته استراکد در رخساره وکستونی؛ ب- تشکیل استیلولیت نامنظم و کم دامنه در رخساره (فلوتستون- رودستون رودیستی؛ ج- استیلولیت‌های حلقوی در رخساره وکستونی؛ د- گسترش شدید استیلولیت‌ها ) به‌صورت مجموعه پیچ در پیچ نامنظم ( در رخساره وکستونی. دولومیت‌ها به‌میزان زیادی در امتداد استیلولیت‌ها تشکیل شده‌اند؛ ح- تشکیل رگچه‌های انحلالی در رخساره وکستونی؛ و-استیلولیت‌های پرشده با آغشتگی نفتی (چاه ۳۵۲ گچساران عمق ۲۵۵۰ m)

استیلولیت‌های مذکور از نوع نامنظم حلقوی بوده و بیشتر به‌صورت مجموعه پیچ در پیچ نامنظم تشکیل شده‌اند (شکل ۸ ب، ۸ ج و ۸ د). این استیلولیت‌ها در رخساره گل پشتیبان به راحتی تشکیل شده [۵]، دلیل گسترش آنها می‌باشد. فرآیند دولومیتی شدن در امتداد این استیلولیت‌ها به‌میزان زیادی مشاهده شده است (شکل ۸ د).

استیلولیت‌ها در سازند مورد مطالعه در رخساره های وکستونی بیشتر دیده شده، و رخساره‌های گرینستونی به‌دلیل تشکیل سیمان در دیاژنز اولیه تحت تأثیر فشردگی کمتری قرار گرفته‌اند. در سازند ایلام رگچه‌های انحلالی نیز تشکیل شده‌اند (شکل ۸ ح) که نسبت به استیلولیت‌ها گسترش کمتری دارند.

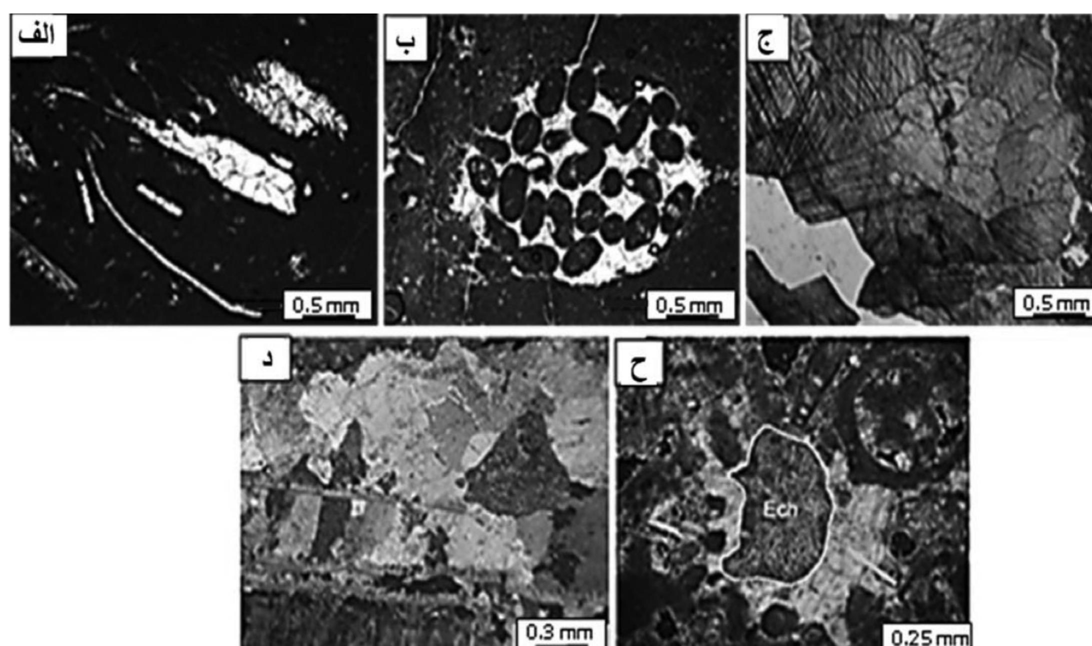
این رگچه‌ها بیشتر در رخساره‌های وکستونی تشکیل شده‌اند. استیلولیت‌ها در خیلی از موارد آغشتگی نفتی دارند (شکل ۸ و). استیلولیت به‌عنوان معبر یا کانال جریانی عمل نموده سپس توسط بخش‌های ریز دانه و یا مواد آلی پر می‌شوند. لذا در ابتدا موجب افزایش تخلخل و در نهایت کاهش تخلخل را در پی داشته و تنها هتروژنی مخزن را باعث می‌شوند.

**سیمانی شدن**

انواع سیمان کربناته اغلب موجب تغییر یا تخریب حفرات سنگ می‌شوند [۴۱]. در سازند ایلام، سیمان از نوع کلسیتی بوده، دارای فابریک هم بعد، بلوکی، دروزی و هم محور یا سین تکسیال به‌صورت پرکننده حفرات، شکستگی‌ها (سیمان رگه‌ای) و منافذ اجزای اسکلتی است (شکل ۹). سیمان هم بعد با بلورهای شکل‌دار و نیمه شکل‌دار بیشتر در حجره قطعات اسکلتی) از جمله رودیست و فرامینیفرهای بنتیک( تشکیل شده، نشان‌دهنده محیط متئوریک و تدفینی است [۴۸،۱]. سیمان با بلورهای درشت و شفاف (شکل ۹ الف الی ۹ ج)، فضاهای خالی) حفرات و شکستگی‌ها( را به‌صورت بخشی یا کامل پر کرده است. همچنین، گاهی این نوع سیمان در قالب‌های حل شده اجزای اسکلتی تشکیل شده است. این نوع سیمان تقریباً در همه رخساره‌های سازندهای مورد مطالعه به‌صورت پرکننده حفرات و شکستگی (بیشتر در رخساره وکستونی)، و به‌صورت پرکننده قالب‌های قطعات اسکلتی (بیشتر در رخساره پکستونی و گرینستونی( مشاهده شد. سیمان بلوکی (شکل ۹ د) نسبت به سایر فابریک‌های سیمان دارای بیشترین فراوانی است. سیمان هم محور (شکل ۹ ح) معمولاً در محیط‌های فریاتیک دریایی (نزدیک به سطح، وادوز دریایی و فریاتیک متئوریک تشکیل می‌شود [۴۹].

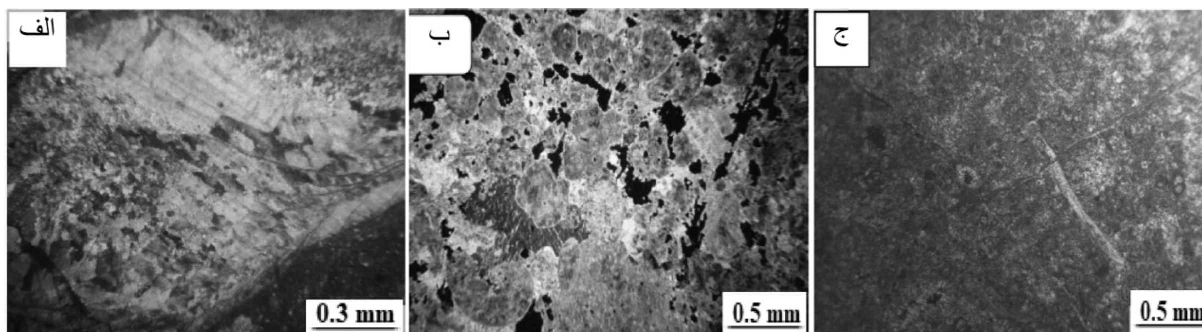
**نئومورفیسم**

تأثیر فرآیند نئومورفیسم در سازند ایلام به‌صورت بیشتر از نوع افزایشی) تبدیل میکریت به میکرواسپار (بوده) (شکل ۱۰ الف) که طی آن موزاییک‌های درشت بلور همراه با تخریب جزئی یا کامل بافت قبلی سنگ ایجاد شده‌اند.




**شکل ۹** تصاویر میکروسکوپی تأثیر فرآیند سیمانی شدن در کربنات‌های سازند ایلام: الف- سیمان هم ضخامت وابسته به فابریک (عمق ۲۵۲۱ m در چاه ۳۵۲)؛ ب- سیمان کلسیتی در اطراف دانه‌های پلوئید (عمق ۲۵۲۷ m چاه ۳۵۲)؛ ج-سیمان هم بعد (عمق ۲۵۴۱ m در چاه ۳۳۵)؛ د- سیمان کلسیت بلوکی در رخساره پکستون پلوئیدی؛ ح- سیمان هم محور در اطراف اکینوئید در رخساره پکستونی (Ech= اکینوئید)

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۷۶-۶۰




**شکل ۱۰** تصاویر میکروسکوپی از تأثیر فرآیند نئومورفیسم، انحلال و شکستگی در سازند ایلام: الف- نئومورفیسم، کلسیتی شدن در رخساره فلوتستون-رودستون رودیستی؛ ب- انحلال غیرفابریک انتخابی؛ ج-تخلخل حاصل از شکستگی در رخساره وکستونی

نئومورفیسم افزایشی بیشتر در رخسارههای مادستونی و وکستونی، و کلسیتی شدن اجزای اسکلتی در انواع رخسارهها رخ داده است. کلسیتی شدن در محیطهای متئوریک، دریایی و تدفینی و نئومورفیسم افزایشی طی دیاژنز تدفینی ممکن است رخ دهند [۵۰-۵۱].

**انحلال**

انحلال کانیهای کربناته باعث ایجاد یا تغییر فضاهای خالی در سنگ مخزن میشود [۲ و ۵۲]. این فرآیند بهصورت انحلال قطعات اسکلتی و ماتریکس رخ داده، باعث ایجاد انواع تخلخل ثانویه از قبیل حفرهای، قالبی و درون فسیلی شده است. انحلال اولیه آراگونیت و کلسیت با منیزیم بالا در محیط دیاژنتیکی دریایی یا در شرایط دفن کم عمق رخ میدهد [۵۳]. درسازند ایلام فرآیند انحلال بهمیزان بالایی تخلخل حفرهای ایجاد کرده )شکل۱۰ب(، و با وجود اینکه فرآیند سیمانی شدن بعضی از این حفرات را پر نموده، ولی درصد بالایی از آنها حفظ شده است.

**شکستگی و پرشدگی**

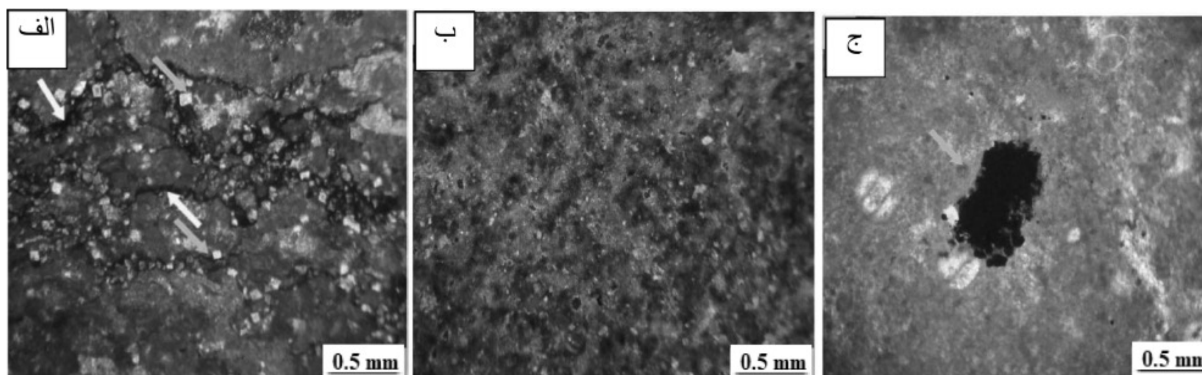
شکستگی نقش بسیار مهمی در تغییر خواص پتروفیزیکی مخازن کربناته ایفا میکند [۵۴- ۵۵]. تعدادی از شکستگیهای ایجاد شده بهصورت باز و نیمه بازبوده، در افزایش تخلخل وتراوایی این سازند نقش داشته باشند. اگرچه این شکستگیها در ایجاد تخلخل ثانویه مؤثر هستند، اما بسیاری از آنها بهصورت جزئی و یا کامل توسط سیمانهای کلسیت بلوکی و دروزی پر شده و بهصورت رگههای کلسیتی درآمدهاند (شکل ۱۰ ج) که در اندازههای مختلف در سازند ایلام تشکیل شدهاند.

**جانشینی**

فرآیند جانشینی در کربناتهای مورد مطالعه بهصورت دولومیتی شدن، هماتیتی شدن و پیریتی شدن مشاهده شد. دولومیتی شدن- دولومیتها به دو صورت مشاهده میشوند: (۱) بلورهای پراکنده در زمینه و (۲) مرتبط با استیلولیت. فرآیند دولومیتی شدن یکی از فرآیندهای غالب دیاژنزی در سازند ایلام می باشد، که بیشتر بهصورت دولومیتهای مرتبط با استیلولیت است. در فرآیند دولومیتیزاسیون علاوه بر نقش دیاژنز کانیهای رسی سازندهای شیلی )مانند کژدمی(، زمینه میکریتی یکی دیگر از منابع مهم تامین منیزیم است [۵۶-۵۷] که در جریان دیاژنز و فرآیند نئومورفیسم و تبدیل به بلورهای بزرگتر موجب آزاد شدن مقداری یون منیزیم میشود. بافت دولومیت بهصورت ایدیوتوپیک میباشد (شکل ۱۱ الف).

**هماتیتی شدن**- در امتداد استیلولیتها و رگچههای انحلالی و گاهی در زمینه میکریتی مشاهده میشود (شکل ۱۱ ب).

پیریتی شدن- فرآیند دیاژنتیکی است که در محیطهای احیایی اتفاق میافتد [۵۸-۵۹].




**شکل ۱۱** تصاویر میکروسکوپی از تأثیر فرآیندهای دولومیتی، هماتیتی و پیریتی شدن در کربنات‌های سازند ایلام: الف- دولومیت و هماتیتی شدن در امتداد استیلولیت‌ها؛ ب- هماتیتی شدن در زمینه میکریتی؛ ج- پیریت دانه تمشکی جانشین شده در زمینه

در سازند ایلام پیریت عمدتاً به‌صورت دانه تمشکی جانشین شده در زمینه مشاهده شده است (شکل ۱۱ ج). این فرآیند در سازند ایلام گسترش چندانی نداشته است.

### توصیف مخزنی سازند ایلام

این مخزن از سنگ‌های کربناته (آهک و آهک‌های دولومیتی) با تخلخل کم تشکیل شده است. با توجه به تخلخل کم این سنگ‌ها (متوسط ۲/۵٪)، نقش موثر شکستگی‌ها در تولید از این مخزن به‌طور چشم‌گیری اهمیت دارد. بخش شرقی آن نسبت به قسمت‌های دیگر از پیچیدگی بیشتری بدلیل تاثیر از گسل‌های تراستی در جنوب و شمال میدان و ساختار خطی خارک ـ میش برخوردار است. گسل تراستی مورد اشاره در بخش جنوب شرقی میدان باعث گردید تا یال جنوبی مخزن آسماری و بنگستان تا ۷۵ درجه شیب پیدا کنند. بستگی ساختمانی مخزن ایلام در این میدان نیز با توجه به آخرین کنتور بسته (۲۷۰۰ m) (شکل ۶ ب) محاسبه شد. بخش بالایی سازند ایلام با ناپیوستگی فرسایشی به‌صورت مستقیم برروی سازند سروک قرار گرفته است. این موضوع تفکیک دو واحد آهکی را مشکل کرده است. در راس سازند ایلام یک زون هوازده قرار می‌گیرد که در زیر آن لایه‌های آهکی ـ دولومیتی سازند ایلام قرار داشته که متعلق به محیط کم عمق است. در سازند ایلام دو ناپیوستگی فرسایشی مهم بعد از سنومانین و تورنین رخ داده است. این دو ناپیوستگی در میدان گچساران از غرب به‌سمت شرق مخزن در یکدیگر ادغام می‌شوند. هرچند ضخامت این زون از شمال غرب به‌طرف جنوب شرق کاهش می‌یابد.

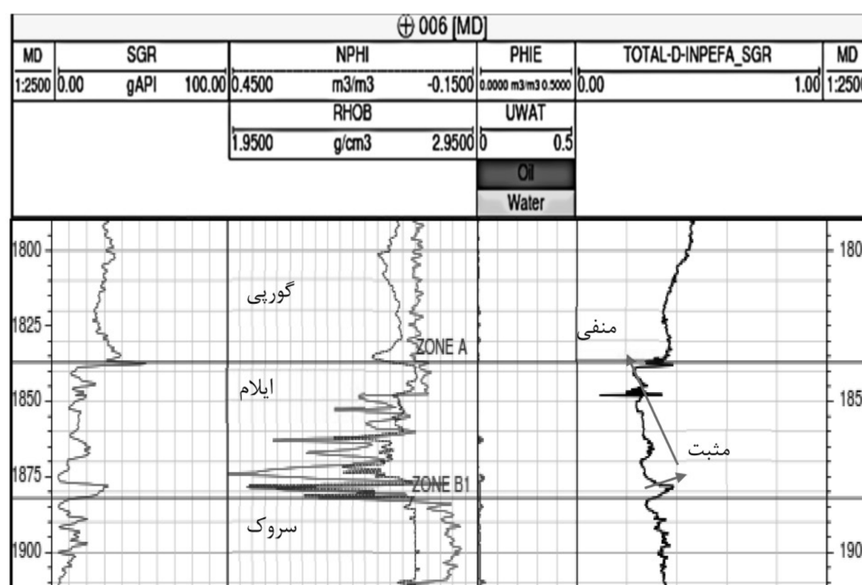
حداکثر ضخامت آن در چاه‌های حفاری شده در غرب میدان حدود ۱۰۰ m و از غرب به‌سمت شرق روندی کاهشی دارد. میانگین تخلخل و اشباع آب در مخزن ایلام به‌ترتیب ۲/۳٪ و ۸۸٪ و نسبت ضخامت مفید به کل ۰/۰۱۶ می‌باشد. تغییرات تخلخل در بخش‌های مختلف از صفر تا ۱۰٪ و میزان اشباع آب از ۱۳ الی ۱۰۰٪ تغییرات نشان می‌دهد. مقادیر ضخامت مفید به‌کل، اشباع آب مؤثر و تخلخل مؤثر سازند ایلام را در بعضی از چاه‌ها جدول ۲ ملاحظه می‌کنید. براساس آزمایشات معمولی مغزه، تخلخل نمونه‌های شکاف‌دار ۱/۴۲۷٪ و تراوایی آنها ۲/۵۶ mD و لی در نمونه‌های بدون شکاف ۱/۰۴٪ تخلخل و ۰/۰۵ mD تراوایی نشان دادند. تغییرات نفوذپذیری مخزن عمدتا قبل از تأثیر اثر کلینکنبرگ بین ۰/۰۱ الی ۹/۹۱ mD ولی بعد از اصلاح این اثر بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۳۲۷۰۵ mD قرار می‌گیرد. در شکل ۱۲ نمودارهای پتروفیزیکی و تغییرات پارامترهای گاما، تخلخل نوترونی، چگالی و نیز منحنی تغییرات INPEFA [1] نشان داده شده است.

1. Integrated Prediction Error Filter Analysis

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۷۶-۶۰

**جدول ۲** داده‌های مخزنی سازند ایلام در بعضی از چاه‌ها با برش: PHIE=4.5; SWE<50; Vsh<50

| شماره چاه / پارامتر | ۱۸۹ | ۱۹۶ | ۲۰۷ | ۳۱۴ | ۳۱۶ | ۳۳۵ | ۳۳۹ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ضخامت مفید به کل (m/m) | ۰/۱۲۳ | ۰/۱۱۲ | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۵۳ | ۰/۰۷۷ | ۰/۰۳۶ | ۰/۱۵۷ |
| میانگین تخلخل مؤثر(v/v) | ۰/۱۰۵ | ۰/۰۶۳ | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۶۴ | ۰۶/۰ | ۰/۰۷۸ | ۰/۰۵۹ |
| میانگین اشباع آب مؤثر (vlv) | ۰/۲۷۹ | ۰/۲۳۳ | ۰/۱۶۹ | ۰/۱۸۸ | ۱۵۳/۰ | ۰/۴۲ | ۰/۲۲۵ |




**شکل ۱۲** نمودار پتروفیزیکی سازند ایلام در چاه ۶ میدان گچساران

این منحنی از تبدیل منحنی PEFA حاصل شده، نشان دهنده اختلاف تجمعی بین مقادیر لاگ پیش بینی شده و مقادیر واقعی لاگ است. منحنی PEFA را می‌توان با استفاده از یک لاگ حساس به رخساره مانند نمودار گاما محاسبه کرد [۶۰- ۶۱]. در نرم‌افزار سیکلولاگ تغییرات زیاد PEFA ممکن است در ارتباط با حوادث زمین‌شناسی مثل تغییر در آب و هوا، دینامیک حوضه و وقفه‌های چینه‌شناسی باشد. اگر نمودار به‌سمت صفر تغییر کند، روند منفی یا کاهشی دارد. این روند منفی در منحنی INPEFA نشان دهنده بخشی از داده است که مقادیر واقعی لاگ کمتر ازمقدار پیش‌بینی شده در نمودار INPEFA است. به‌طور کلی، می‌توان این روند منفی را به‌عنوان پسروی و روند مثبت را به‌عنوان پیشروی در نظر گرفت. مثبت شدن به‌سمت بالا نشان دهنده افزایش رسوبات دانه ریز، عمیق شوندگی و هم چنین افزایش فاصله از خط ساحلی است. به‌عنوان مثال نمودار INPEFA در چاه شماره ۶، نشان‌دهنده کاهش عمق حوضه رسوبی به‌سمت رأس میدان یا پسروی دریا است.

**نتیجه‌گیری**

مطالعه رخساره‌ای سازند ایلام در چاه‌های حفاری شده میدان نفتی گچساران منجر به شناسایی تعداد ۵ ریزرخساره شده که در ۲ کمربند رخساره‌ای اصلی نهشته شده‌اند. این کمربنده و ریز رخساره‌ها عبارت‌اند از پشته‌های ساحلی (MF1 - گرینستون)؛ لاگون محدودشده و دریای باز (MF2 - وکستون حاوی خرده‌های رودیست و فرامینیفرای بزرگ؛ MF3 - وکستون و مادستون حاوی قطعات جلبک و فرامینیفرای بنتیک؛ MF4 - وکستون و پکستون حاوی قطعات جلبک و فرامینیفرای بنتیک و MF5 - مادستون با فونای محدود لاگون). آنالیز رخساره‌ای کربنات‌های سازند ایلام در میدان مطالعه شده نشان داد که این سازند در یک محیط پلاتفرم کربناته از نوع شلف تشکیل شده است.

کربنات‌های سازند ایلام در میدان نفتی گچساران تحت تأثیر طیف وسیعی از فرآیندهای دیاژنتیکی انحلال، سیمانی شدن، میکریتی شدن، استیلولیتی شدن، جانشینی به‌صورت شیمیایی و بیوشیمیایی (دولومیتی شدن، هماتیتی‌شدن و پیریتی‌شدن)، فشردگی (فیزیکی و شیمیایی) و شکستگی (مکانیکی) قرار گرفته‌اند.

تغییرات پارامترهای پتروفیزیکی در مخزن ایلام نشان داد که میانگین تخلخل، اشباع آب و نسبت ضخامت مفید به کل در مخزن ایلام به‌ترتیب ۲/۳٪، ۸۸٪ و ۰/۰۱۶ می‌باشد. مقادیر تخلخل و اشباع آب در بخش‌های مختلف به‌ترتیب از ۱۰-۰٪ و میزان ۱۰۰-۱۳٪ تغییرات نشان می‌دهد. با توجه به پایین بودن میزان تخلخل، نقش شکستگی و سایر فرآیندهای دیاژنزی در کیفیت مخزن اهمیت داشته، فعالیت بلندی قدیمی در بخش شرقی نیز در توزیع رخساره‌ای سازند ایلام مشهود است. بنابراین مخزن توسط عوامل متعدد رسوبی، دیاژنزی، تکتونیکی کنترل شده، کیفیت مخزنی آن در بخش‌های مختلف بسیار متغییر خواهد بود.

**تشکر و قدردانی**

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از بخش‌های پژوهشی دانشگاه آزاد، دانشگاه شهید چمران اهواز و مناطق نفت خیز جنوب تشکر و قدردانی نمایند. همچنین لازم است که از سردبیر محترم، داوران علمی مجله و همه کسانی که در این کار تحقیقی ما را به‌نحوی کمک و راهنمایی نموده و نظریات بسیار ارزشمند آنها در ارتقا کیفی مقاله مؤثر بوده، قدردانی و سپاس‌گزاری نمایند.

**مراجع**

[1]. Flügel E (2010) Microfacies of carbonate rocks, analysis interpretation and application: Berlin- Heidelberg, New York, Springer, 976.
[2]. Lucia F J (2007) Carbonate reservoir characterization, Spring, 2nd ed, New York, 226.
[3]. Weidlich O (2010) Meteoric diagenesis in carbonate below karst unconformities: hetrogenity and control factors: IN geological socity, London, species Publication, 329: 291-315.
[4]. Ahr W M (2008) Geology of carbonat reservoir, 1st Edition, Johon Wiley and Sons, 1-296.
[5]. Ehrenberge S N, Pickard N A H, Laursen G V, Mossadegh Z K, Svana T A, Aqrawi A A M, Mcarthur J M, Thirlwall M F (2007) Strontium isotope stratigraphy of the Asmari formation (Oligocens- Lower Miocens), SW Iram: Journal of Petroleum Geology, 30, 2: 107-128.
[6]. James G A, Wynd J G (1965) Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area: American Association Petroleum Geolology Bulletin, 40: 2182-224.
[7]. Wood G V, Lacassagne R M (1965) The limestone of the Bangestan group of the Iranian oil consortium, agreement area, Iranian operating oil companies, Tehran, Report 1084.
[8]. Wynd J G (1965) Biofacies of the Iranian oil consortium agreement area, GeoScience World, AAPG Bulleitn, 12, 49: 89.
[9]. Bourgeois F (1969) Kuh-e Bangestan: a model for cretaceous structures in Iran, Iranian Oil Operating Companies Report 89.

[10]. Hart B B (1970) Upper Cretaceous, structural history and prospect of the Khuzestan province: Iranian Oil Operating Companies report 1162, Unpublished.
[11]. Khalili M (1976) The biostratigraphic synthesis of Bangestan Group in southwest Iran: Iranian Oil Operating Companies, Geological and Exploration Division, Report 1219: 79.
[12]. Razin P, Taati F, Vanbuchem F S P (2010) Sequence stratigraphy of Cenomanian–Turonian carbonate platform margins (Sarvak Formation) in the High Zagros, SW Iran: an outcrop reference model for the Arabian Plate, Geological Society London, Special Publications, 329: 187–218.

[۱۳]. غبیشاوی ع، رحمانی ع (۱۳۸۵) سکانس استراتیگرافی سازندهای ایلام و سروک در میدان نفتی آب تیمور چاه شمارۀ ۱۴، گزارش شمارۀ پ- ۵۹۱۸، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، ۳۷.
[14]. Khodaei N, Rezaee P, Honarmand J, Abdollahi-Fard I (2021) Microfacies analysis, sedimentary environment and sequence stratigraphy of the Ilam Formation (Coniacian? - Santonian) in the northwestern part of the Abadan Plain, Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 36, 4, 81: 109-134.
[15]. Vaziri Moghaddam H (2002) Biostratigraphic study of the Ilam and Gurpi formations based on planktonic foraminifera in SE of Shiraz, Iran: Journal of Siences, Islamic Republic of Iran, 13, 4: 339- 356.

[۱۶]. تدینی م (۱۳۹۳) مدل‌سازی انواع شکستگی‌ها در سازند ایلام با استفاده از نگارهای تصویری و داده‌های آزمایش چاه در یکی از مخازن هیدروکربنی جنوب ایران، ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۱۱۰: ۷۰-۶۳.

[۱۷]. سرمدی ر، موسوی حرمی س ر، محبوبی ا (۱۳۹۵) بررسی میکروفاسیس‌ها و محیط رسوبی سازندهای مخزنی ایلام و سروک در میدان نفتی سعادت‌آباد، پژوهش نفت، دوره ۲۶، ۵-۹۵، ۱۷۳-۱۶۱.
[18]. Shahin Y (2019) Geology of West Karun oil fields shared between Iran and Iraq, AAPG Annual Convention and Exhibition, San Antonio, Texas.
[19]. Khosrotehrani Kh, Baghbani D, Keshani F, Omrani M (2011) New founds in biostratigraphy of Ilam Formation at Kuhe Assaluyeh, (Zagros Province) Journal of Geoscience, 20, 78: 53-60.

[۲۰]. سپیانی ح، محبوبی ا، موسوی حرمی ر، محمودی قرایی م ح، غفرانی ا (۱۳۸۹) فرآیندهای دیاژنز و تأثیر آن بر کیفیت مخزنی سازند ایلام، میدان نفتی ماله کوه، شمال باختری اندیمشک، مجله پژوهش نفت، ۲۰، ۸۳-۶۵.

[۲۱]. اسدی مهماندوستی ا (۱۳۸۴) ژئوشیمی و دیاژنز سازند ایلام در میادین نفتی آب تیمور و منصوری و رخنمون تنگ رشیدکوه پیون، منطقه ایذه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ۳۱۱.
[۲۲]. اسدی مهماندوستی ا، دانشیان ج، محمدپناه م ف (۱۳۹۸) بررسی ویژگی‌های رسوبی- دیاژنزی و ژئوشیمیایی سازند ایلام در شمال‌غرب آبدانان، کبیرکوه. پژوهش‌های چینه نگاری و رسوب‌شناسی، ۳۵، ۴: ۱۰۴-۷۷.
[23]. Asadi Mehmandosti E, Bdolmaleki S, Ghalavand H (2017) Microfacies, sedimentary environment and diagenesis of the Ilam Formation in an Oilfield of the Abadan plain, Applied Sedimentology, 5, 9: 21-39.

[۲۴]. چهارده چریک غ (۱۳۸۵) زیست چینه‌نگاری سازند ایلام ) مقطع تیپ ( براساس فرامینیفرهای پلانکتونیک، جنوب غرب ایلام، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ۳۲۲.
[25]. Rikhtegarzadeh M, Vaziry S M, Aleali M, Amir Bakhtiar H, Jahani D (2017) Microbiostratigraphy, microfacies and depositional environment of the Sarvak and Ilam Formations in the Gachsaran Oilfield, Southwest Iran, Micropaleontology, 63, 6: 413-428.
[26]. Mehrabi H, Rahimpour-Bonab H, Enayati-Bidgoli A H, Navidtalab A (2013) Depositional environment and sequence stratigraphy of the Upper Cretaceous Ilam Formation in central and southern parts of the Dezful Embayment, SW Iran, Carbonate and Evaporites, 29, 3.

[۲۷]. وزیری مقدم ح، صفری ا (۱۳۸۲) میکروفاسیس‌ها و محیط رسوبی سازند ایلام در منطقه سمیرم، مجله پژوهشی دانشگاه اصفهان) علوم پایه، ۱۸: ۷۴-۵۹.
[28]. Zohrabzadeh M, Rahimpour–Bonab H, Aleali1 M (2020) The middle cretaceous – lower miocene 3D petroleum system modeling of kupal oil field, South West of Iran, Dezful Embayment: Geopersia, 10, 1: 165-194.
[29]. Atashbari V, Tingay M, Amrouch K H (2018) Stratigraphy, tectonics and hydrocarbon habitat of the Abadan

Plain Basin: a geological review of a prolific Middle Eastern hydrocarbon province, Geosciences, 8, 12: 496, 17.
[30]. Rajabi M, Sherkati S, Bohloli B, Tingay M (2010) Subsurface fracture analysis and determination of in-situ stress direction using FMI logs: An example from the Santonian carbonates (Ilam Formation) in the Abadan Plain, Iran, Tectonophysics, 492: 192–200.
[31]. Sherkati S, Letouzey J (2004) Variation of structural style and basin evolution in the Central Zagros (Izeh Zone and Dezful Embayment) Iran, Marin and Petroleum Geology, 21: 535-554.
[32]. Dunham R J (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture, American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Memoir, 1: 108-121.
[33]. Schlager M (2002) Sedimentology and sequence stratigraphy of carbonate rocks: Amsterdam (Vrije Universiteit/ Earth and Life Sciences), 146: 114.
[34]. Choquette P W, Pray, L C (1970) Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates: American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Bulletin, 54: 207- 250.
[35]. Richter F M, Rowley D B, DePaolo D J (1992) Sr-isotope evolution of seawater: the role of tectonics, Earth and Planetary Science Letters, 109: 11-23.
[36]. Zhang Y, Yang T, Hohl S V, Zhu B, He T, Pan W, Chen Y, Yao X, Jiang S (2020) Seawater carbon and strontium isotope variations through the late Ediacaran to late Cambrian in the Tarim Basin, Precambrian Research, 105769.
[۳۷]. موسوی زاده س م ع (۱۳۹۸) بررسی روند تغییرات دمای دیرینه در نهشته‌های کربناته آپتین - آلبین در زون چین‌خورده- راندۀ زاگرس بر مبنای داده‌های ایزوتوپ اکسیژن. پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۳۵، ۱: ۷۲-۵۵.
[۳۸] رحیم‌پور بناب ح (۱۳۹۱) چینه‌شناسی سازندهای ایلام و سروک با استفاده از ایزوتوپ استرانسیم و تعیین مرز انها در بخش میانی فرو افتادگی دزفول، مناطق نفتخیز جنوب، طرح ۰۲۷۴-۱۱-۸۷، ۴۴۷.
[39]. Neto I A L, Misságia, R M, Ceia M A, Archilha N L, Oliveira L C (2014) Carbonate pore system evaluation using the velocity–porosity–pressure relationship, digital image analysis, and differential effective medium theory, Journal of Applied Geophysics, 110: 23–33.
[40]. Lamarche J, Lavenu A P C, Gauthier B D M, Guglielmi Y, Jayet O (2012) Relationships between fracture patterns, geodynamics and mechanical stratigraphy in carbonates (South-East Basin, France): Tectonophysics, 581: 231-245.
[41]. Moore C H, Wade W J (2013) Carbonate reservoir porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework: Developments in Sedimentology, 67: 1- 374.
[42]. Tucker, M. E. (2001) Sedimentary petrology: an introduction to the origion of sedimentary rocks: Blackwell, Scientific Publication, London, 260.
[43]. Makhloufi Y, Collin P Y, Bergerat F, Casteleyn L, Claes S, David C H, Menendez B, Monna M, Robion P H, Sizun J P, Swennen R, Rigollet C H (2013) Impact of sedimentology and diagenesis on the petrophysical properties of a tight oolitic carbonate reservoir, The case of the oolithe Blanche Formation (Bathonian, Paris Basin, France), Marine and Petroleum Geology, 48: 323-340.
[44]. Sahraeyan M, Bahrami M, Arzaghi S (2014) Facies analysis and depositional invironments of the Oligocene-Miocene Asmari Formation, Zagros Basin, Iran, Geoscience Frontiers, 5: 1- 10.
[45]. El-Saiy A K, Jordan B R (2007) Diagenetic aspects of tertiary carbonates west of the Northern Oman Mountains, United Arab Emirates, Journal of Asian Earth Sciences, 31: 35-43.
[46]. Zhen-Kui J, Chun-Hui L (2008) Quantitative study on reservoir diagenesis in Northern Dagang Structural Belt, Huanghua Depression, Petroleum Exploration and Development, 35, 5: 581–587.
[47]. Henares S, Caracciolo L, Cultrone G, Fernandez J, Viseras C (2014) The role of diagenesis and depositional facies on pore system evolution in a Triassic outcrop analogue (SE Spain), Marine and Petroleum Geology, 51: 136–151.
[48]. Adabi M H, Asadi Mehmandosti E (2008) Microfacies and geochemistry of the Ilam Formation in the Tang-E Rashid area, Izeh, SW Iran, Journal of Asian Earth Sciences, 33: 267–277.
[49] Deville De Periere M, Durlet C, Vennin E, Lambert L, Bourillot R, Caline B, and Poli E (2011) Morphometry of micrite particles in Cretaceous microporous limestones of the Middle East, Influence on reservoir properties: Marine and Petroleum Geology, 28: 1727–1750.
[50]. Hoseinabadi M, Mahboubi A, Mirab Shabestari G R, Motamed A (2016) Depositional environment, diagenesis, and geochemistry of Devonian Bahram Formation carbonates, Eastern Iran, Arab Journal Geoscience, 9: 70.
[51] Tucker M E, Wright V P (1990) Carbonate sedimentology, Oxford, Blackwell Scientific Publications, 482.
[52]. Shakeri A, Parham S (2014) Microfacies, depositional environment and diagenetic processes of the Mauddud member, in a feld in the Persian Gulf, Journal Geological Geoscience, 2: 67–78.
[53]. Aghaei A, Mahboubi A, Moussavi- Harami R, Nadjafi M, Hakrapani G J (2014) Carbonate diagenesis of

the Upper Jurassic succession in the West of Binalud- Eastern Alborz (NE Iran), Journal Geological Society of India, 83: 311- 328.
[54]. Ebadati N (2018) Fractures effect in reservoir quality of Ilam and Sarvak formations in Hengam oilfield using imaging logs, Journal of Geolical Society of India, 92: 491–497.
[55]. Vandeginste V, John C M, Manning C (2013) Interplay between depositional facies, diagenesis and early fractures in the Early Cretaceous Habshan Formation, Jebel Madar, Oman: Marine and Petroleum Geology, 43: 489-503.
[56]. Hood S D, Nelson C S, Kamp P J J (2004) Burial dolomitisation in a cool-water carbonate petroleum reservoir: the Oligocene Tikorangi Formation, Taranaki Basin, New Zealand: Sedimentary Geology, 172: 117-138.
[57]. Mehmood M, Yaseen M, Khan E U, Khan M J (2018) Dolomite and dolomitization model- A short review, International Journal of Hydrology, 2, 5: 549–553.
[58]. Hajikazemi E, Al-Aasam I S, and Conigilo M (2010) Subaerial exposure and meteoric diagenesis of the Cenomanian–Turonian Upper Sarvak Formation, southwestern Iran, Geological Society, London, Special Publications, 330: 253-272.
[59]. Wang Y M, Hendy I L, Latimer J C, Bilardello D (2019) Diagenesis and iron paleo-redox proxies: New perspectives from magnetic and iron speciation analyses in the Santa Barbara Basin, Chemical Geology, 519: 95-109.
[60]. Soua M (2012) Application of facies associations, integrated prediction error filter analysis, and chemostratigraphy to the organic-rich and siliceous Cenomanian-Turonian sequence, Bargou Area, Tunisia: Integrated sequence stratigraphic analysis, Journal of Geological Research, 15.
[61]. Yuan R, Zhu R, Qu J, Wu J, You X, Sun Y, Zhou Y (2018) Utilizing integrated prediction error filter analysis (INPEFA) to divide base-level cycle of fan-deltas: A case study of the Triassic Baikouquan Formation in Mabei Slope Area, Mahu Depression, Junggar Basin, China, Open Geoscience, 10: 1.

# حذف کلرید منیزیم توسط غشاهای نانوفیلتراسیون تهیه شده از نانوذرات اکسید مس

**شکیبا قهیه‌ئی، عبدالرضا مقدسی*، سمانه بنده‌علی*، مرتضی حبیبی و مریم اسکندری**
دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۳

**چکیده**

در این تحقیق ابتدا نانوذرات مس اکسید تک ظرفیتی به‌روش الکتروشیمیایی سنتز شدند و از نانوذرات سنتز شده برای اصلاح و ساخت غشاهای نانوفیلتراسیون بر پایه پلی‌اترسولفون استفاده شد. غلظت‌های مختلفی از نانوذرات مس اکسید تک ظرفیتی به‌عنوان افزودنی در پلی‌اترسولفون به‌عنوان ماتریس غشایی جهت تهیه غشاهای نانوفیلتراسیون $PES/Cu_2O$ مورد استفاده قرار گرفت. غشاهای تهیه شده توسط تبدیل فوریه فروسرخ (FT-IR) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) آنالیز شدند. تجزیه و تحلیل FTIR تشکیل پیوندهای مطلوب را در نانوذرات سنتزی مس اکسید تک‌ظرفیتی و غشاهای ساخته شده، نشان داد. عملکرد جداسازی غشاهای ساخته شده با شار آب خالص و پس‌دهی کلرید منیزیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بالاترین شار آب خالص $36/78\ L/m^2h$ را برای غشای ساخته‌شده M1 در ۰/۰۵٪ وزنی نانوذرات $Cu_2O$ نشان داد. علاوه‌بر این، بالاترین میزان پس‌دهی $MgCl_2$ ۷۲٪ در ۲٪ وزنی نانوذرات مس اکسید تک ظرفیتی برای غشای ساخته شده M5 گزارش شد.

**کلمات کلیدی: غشای نانوفیلتراسیون، حذف کلرید منیزیم، نانوذرات مس اکسید، روش‌های اصلاح، خواص جداسازی**

## مقدمه

فن‌آوری غشاء و فرآیندهای غشایی به‌عنوان روش‌های جذاب در فرآیندهای جداسازی اخیراً رو به رشد بوده است. غشاهای نانوفیلتراسیون یکی از انواع غشاهای فیلتراسیون هستند که عملکرد جداسازی بسیار خوبی را برای نمک‌های تک‌ظرفیتی و چندظرفیتی نشان داده‌اند. استفاده از فن‌آوری نانو و مواد نانو به‌عنوان خود غشاء و یا به‌عنوان یک ماده افزودنی در ماتریس غشاء یکی از روش‌های امیدوارکننده برای افزایش عملکرد جداسازی غشاء و خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها است [۱-۵]. گرافن‌اکساید، نانوذرات اکسید فلز، نانولوله‌های کربنی و ... به‌عنوان یک نانومواد آب‌دوست برای ساخت غشاء مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۶ و ۷]. سنتز نانوساختارهای اکسید فلزی با ساختار کنترل شده، خواص نوری، مغناطیسی، حرارتی و کاتالیزوری مفیدی را به نمایش می‌گذارد [۸].

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی a-moghadassi@araku.ac.ir
s-bandehali@phd.araku.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4700.3113)

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۹۰-۷۷

در بین نانوذرات اکسیدهای فلزی، از نانو ذرات مس اکسید به‌صورت محدودتری استفاده شده است. مس اکسید یک ماده با قابلیت بالا جهت حذف آلاینده‌ها در فرآیندهای غشایی است و یک اکسید فلزی ارزان قیمت، غیرسمی است که می‌تواند به آسانی با پلیمرها مخلوط شود و خواص فیزیکی شیمیایی پایداری از خود بروز دهد. همچنین، خواص ضدمیکروبی فوق العاده‌ای در برابر میکروب، قارچ، جلبک و باکتری از خود نشان می‌دهد [۹ و ۱۰]. فرهاد زارعی و همکارانش [۱۱] نانوذرات ترکیبی کبالت فریت مس (II) اکسید با روش رسوب‌دهی شیمیایی سنتز کردند و از آن برای ساخت غشای پلی‌اترسولفون در فرآیند نانوفیلتراسیون استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده کاهش زاویه تماس و زبری غشاء و افزایش شار آب خالص از ۱۲ به $34/5\ L/m^2.h$ را نشان داد. راندیپ سیق و همکارانش [۱۲] یک غشای اولترافیلتراسیون شبکه آمیخته پلی‌سولفون اصلاح شده با فوتوکاتالیست مس (II) اکسید به‌روش وارونگی فاز ساختند. فوتوکاتالیست مس (II) اکسید نیز از روش الکترودپوزیشن ساخته شده بود. برای آنالیز ضدگرفتگی غشاء از محلول آبی نفوذی آلبومین سرم گاوی (BSA) و برای حذف آلاینده دارویی ایبوپروفن استفاده شد. براساس بررسی نتایج مشخص شد که شار و تخلخل و اندازه حفرات و آب‌دوستی غشاء بهبود یافته بود، به‌طوری که حذف دارویی ایبوپروفن به ۸۶٪ رسید. زهای ایکسیو و همکارانش [۱۳] روش مؤثری برای ساخت غشای آنتی‌میکروبیال با خواص ضدباکتریایی خوب و پایدار ارائه کردند. آنها یک غشای پلی‌سولفون ترکیب شده با نانوسیم‌های نقره مس (I) اکسید با روش تغییر فاز تهیه کردند. با انجام تست‌های آنتی‌باکتریال گزارش کردند که غشاهای ترکیب شده دارای اثر آنتی‌باکتریال تقویت شده در برابر هردو اسچریچیا کولی[۱] و استافیلوکوکوس اورئوس[۲] دارد. نازنین نصرالهی و همکارانش [۱۴] تأثیر افزودنی‌های آمین عامل‌دارشده از نانوذرات مس (II) اکسید و روی اکسید بر خصوصیات نفوذپذیری و مورفولوژی غشای نانوکامپوزیتی اولترافیلتراسیون پلی‌اترسولفون را بررسی کردند. سپس از مقایسه دو گروه آمین عامل‌دار شده مشخص شد که کاربرد نانوساختار آمین عامل‌دار شده با مس اکسید در شبکه پلیمری پلی‌اترسولفون یک تأثیر مثبتی در نفوذپذیری داشت که از ۵۵۴/۲ به $886/6\ kg/m^2.h$ با ۰/۵ درصد وزنی آمین عامل‌دارشده مس اکسید رسید. از این طریق، میزان آب‌دوستی و تخلخل غشاء افزایش یافت و منجر به بهبود قابل توجهی در میزان شار آب خالص شد. در این مطالعه، نانوذرات مس اکسید به‌روش الکتروشیمیایی سنتز شدند. این نانوذرات به‌طور گسترده در سلول‌های خورشیدی، حسگرها (حس‌گرهای زیستی و گاز)، دستگاه‌های حافظه پلیمری، دستگاه‌های نیمه‌رسانا، به‌عنوان فوتوکاتالیست و الکتروکاتالیست، باتری‌های یونی لیتیوم استفاده می‌شوند [۱۷-۱۵]. تاکنون استفاده از نانوذرات اکسید مس تک ظرفیتی در ساخت غشاهای نانوفیلتراسیون گزارش نشده است. نانوذرات سنتز شده اکسید مس تک ظرفیتی در ساختار غشاهای PES مورد استفاده قرار گرفتند. از آنجایی‌که میزان بالای کلرید منیزیم باعث سختی آب می‌شود و مقدار آن براساس استاندارد ملی باید محدود باشد، توجه به مقدار کلرید منیزیم در آب آشامیدنی ضروری است. بنابراین، غشاهای ساخته شده جهت حذف کلرید منیزیم از آب مورد استفاده قرار گرفتند. غشاهای اصلاح شده و اصلاح نشده با آنالیزهای FTIR و SEM مشخص شدند. سپس عملکرد جداسازی غشاهای آماده شده با شار آب خالص و پس‌دهی نمک $MgCl_2$ مورد بررسی قرار گرفت.

1. Escherichia Coli
2. Staphylococcus Aureu

## مواد و روش انجام آزمایش‌ها

### مواد مورد استفاده

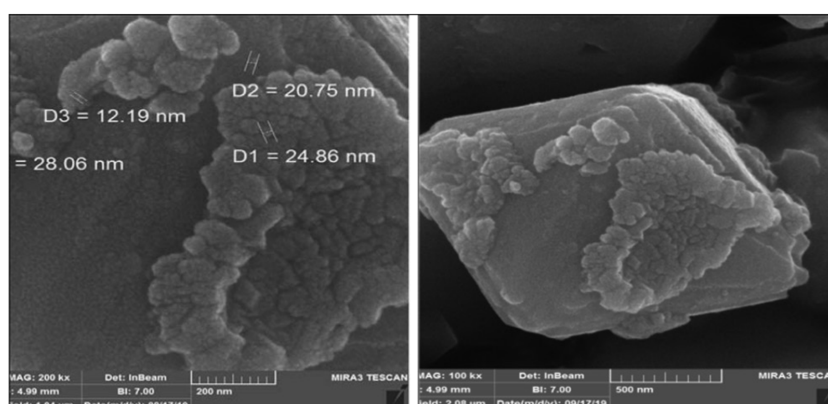
پلی‌اترسولفون (PES) تهیه شده از شرکت BASF به‌عنوان ماده تشکیل‌دهنده بدنه غشاء با وزن ملکولی ۵۸۰۰۰ گرم بر مول، پلی‌وینیل پیرولیدون (PVP) تهیه شده از Merck آلمان به‌عنوان حفره‌ساز با وزن مولکولی ۲۵۰۰۰ g/gmol استفاده شد. از دی‌متیل استامید (DMAC) تولید شده توسط شرکت Merck نیز به‌عنوان حلال پلیمر با وزن مولکولی ۸۷/۱۲ g/gmol استفاده گردید. همچنین، آب بدون یون به‌عنوان حمام غیرحلال در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفتند. از نانوذرات مس (I) اکسید ($Cu_2O$) ( شکل ۱)، که با روش الکتروشیمیایی سنتز شدند به‌عنوان اصلاح‌کننده سطح غشاء مورد استفاده قرار گرفت. از کلرید منیزیم ($MgCl_2$) ساخت شرکت Merck برای بررسی عملکرد غشاها استفاده شد.

### سنتز نانوذرات

پس از مطالعه و تحقیق در زمینه تولید مس (I) اکسید با یک روش بهینه سرانجام این نتیجه حاصل شد که روش الکتروشیمیایی به‌دلیل مراحل کوتاه تولیدی، راهبری آسان‌تر، تولید در مقیاس بالاتر، کیفیت بالاتر، مقرون به‌صرفه بودن و کنترل شرایط عملیاتی آسان‌تر برای تولید در مقیاس انبوه در بین روش‌های دیگر مناسب‌تر است [۲۳-۱۸]. روش الکتروشیمیایی بر پایه الکترولیز محلول آبی نمک طعام با افزودن سدیم هیدروکسید می‌باشد. در این روش، آندی از جنس مس با خلوص (۹۹/۹۹٪) و کاتد الکترودی از جنس استنلس استیل به ابعاد ۵۶×۵۰ mm استفاده شد [۲۴]. واکنش در یک سل الکترولیتی در شرایط عملیاتی با دمای ۸۰ °C و pH=۱۰/۱ در ولتاژ ثابت ۲ V به‌مدت زمان ۳۰ min صورت گرفت. رسوب تشکیل شده حاصل از الکترولیز و انحلال آندی مس، بعد از ته‌نشینی برای از بین بردن یون کلرید چندین مرتبه با آب مقطر شست و شو شده و سپس در هوای اتاق خشک شد. برای جلوگیری از آلوده شدن محصول با مس فلزی از دیافراگم از جنس پلی‌پروپیلن در اطراف کاتد استفاده شد.

### ساخت غشاهای نانوفیلتراسیون پلی‌اترسولفون

غشاهای نانوفیلتراسیون توسط روش وارونگی فاز و غوطه‌وری در آب بدون یون ساخته شدند. برای ساخت غشاها با این روش، محلول‌های پلیمری حاوی پلی‌اترسولفون به‌عنوان پلیمر بدنه، پلی‌وینیل پیرولیدن به‌عنوان حفره‌ساز، نانوذرات مس (I) اکسید در غلظت‌های مختلف به‌عنوان اصلاح‌کننده و دی‌متیل استامید به‌عنوان حلال به‌مدت ۵ h توسط یک همزن مغناطیسی با سرعت ۳۰۰ rpm هم زده شدند تا مواد به‌طور کامل حل شده و محلول‌های یکنواختی حاصل شود. ترکیب درصد محلول‌های پلیمری تهیه شده در جدول ۱ آمده است.




شکل ۱ آنالیز FESEM نانوذرات سنتز شده مس (I) اکسید

**جدول ۱** مشخصات ترکیب درصد محلول‌های پلیمری غشاهای ساخته شده

| شماره غشاء | پلی‌اترسولفون (%.wt) | پلی‌وینیل پیرولیدن (%.wt) | نانو ذره مس (I) اکسید (%.wt) | دی‌متیل استامید (%.wt) |
|---|---|---|---|---|
| M0 | ۱۸ | ۱ | ۰/۰۰ | ۸۱/۰۰ |
| M1 | ۱۸ | ۱ | ۰/۰۵ | ۸۰/۹۵ |
| M2 | ۱۸ | ۱ | ۰/۱۰ | ۸۰/۹۰ |
| M3 | ۱۸ | ۱ | ۰/۵۰ | ۸۰/۵۰ |
| M4 | ۱۸ | ۱ | ۱/۰۰ | ۸۰/۰۰ |
| M5 | ۱۸ | ۱ | ۲/۰۰ | ۷۹/۰۰ |

سپس جهت پراکندگی بهتر نانوذرات محلول‌ها به‌مدت ۴۰ min درون دستگاه اولتراسونیک قرارگرفتند. دستگاه اولتراسونیک منجر به پراکندگی یکنواخت نانوذرات و مانع تشکیل پدیده کلوخگی و تجمع نانوذرات در محلول‌های فوق می‌شود. برای خروج حباب‌های هوا از داخل محلول به‌مدت ۱۲ h در دمای اتاق نگهداری شدند. در مرحله بعد، محلول‌های یکنواخت حاوی نانوذرات توسط یک فیلم‌کش دستی (ضخامت ۳۰۰ µm، ساخت ایران) روی یک صفحه شیشه‌ای تمیز و خشک با سرعت یکسان و پیوسته پخش کرده و سپس بلافاصله به یک حمام آب بدون یون در دمای اتاق انتقال و غوطه‌ور شدند. در این مرحله، حلال دی‌متیل استامید توسط آب به‌عنوان غیرحلال خارج می‌شود و این عمل باعث شکل‌گیری غشاء می‌گردد. سپس غشاها با آب بدون یون شسته شده و برای اطمینان از خارج شدن حلال و مواد محلول در آب به‌مدت ۲۴ h در داخل ظرف حاوی آب بدون یون قرار گرفتند. غشاهای ساخته شده بین دو صفحه کاغذ صافی به‌مدت ۲۴ h در هوای اتاق قرار داده شدند تا به‌طور کامل خشک شوند.

**ارزیابی غشاها و نانوذرات**

جهت شناسایی گروه‌های عاملی موجود در غشاء و نانوذره مس (I) اکسید، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه با دستگاه اسپکترومتر انجام شد. از رابطه ۱ برای محاسبه درصد تخلخل و از رابطه ۲ برای محاسبه مقدار اندازه حفرات استفاده شد:

$$\varepsilon(\%) \equiv \frac{W_w - W_d}{\rho_f V_m} \times 100 \qquad (۱)$$

در رابطه ۱ $W_w$، $W_d$، $V_m$، $f_p$ به‌ترتیب وزن غشاء خیس و خشک برحسب گرم، حجم غشاء (نماد واحد) و دانسیته آب (نماد واحد) می‌باشد. جهت اندازه‌گیری وزن خیس و خشک غشاها، ابتدا نمونه‌های غشایی به‌مدت ۲۴ h در داخل آب بدون یون قرار داده شدند. سپس وزن آن‌ها با ترازو اندازه گرفته شد. پس از آن غشاها درون آون به‌مدت ۸ h با دمای ۵۰ °C قرار دادیم تا به‌طور کامل خشک شوند و وزن آن‌ها نیز اندازه گرفته شود [۲۵-۲۷].

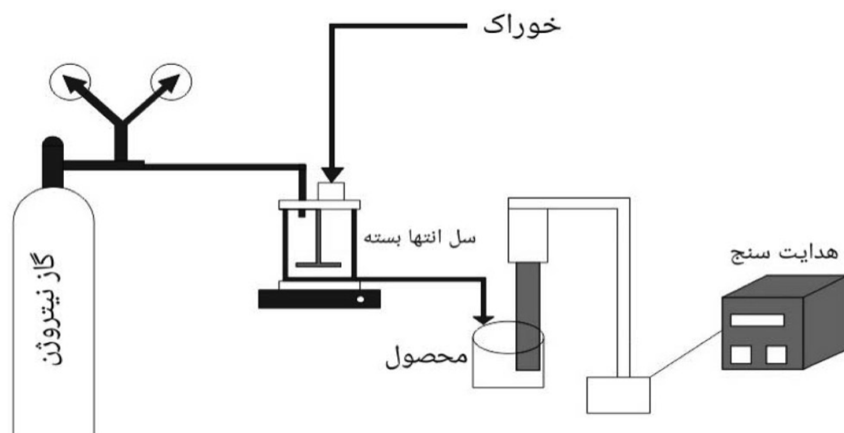
$$r_m \equiv \sqrt{\frac{(2.9 - 1.75\varepsilon) 8\eta LQ}{\varepsilon A \Delta p}} \qquad (۲)$$

ε تخلخل غشاء، η ویسکوزیته آب ($۸/۹ \times ۱۰^{-۴}$ Pa.s)، L ضخامت غشاء برحسب m، Q حجم شار آب خالص خروجی از غشاء برحسب $m^3/s$ است. A سطح مقطع غشاء برحسب $m^2$ و Δp فشار عملیاتی (۰/۴۵ MPa) می‌باشد [۲۸].

**شار و عملکرد جداسازی غشاء**

عملکرد غشاهای ساخته شده توسط یک سل فیلتراسیونی ته بسته[1] مانند شکل ۲ با مساحت سطح مؤثر ۱۱/۹۴ $cm^2$ اندازه‌گیری شد. یک همزن الکتریکی درون سیستم جهت کاهش اثر پلاریزاسیون غلظتی و عدم تشکیل کیک بر روی سطح غشاء به‌کار گرفته شد. همچنین، یک مخزن گاز نیتروژن به‌عنوان تأمین کننده نیروی محرکه جهت انتقال جرم با یک شیر تنظیم‌کننده فشار خروجی نیز مورد استفاده قرار گرفت.

1. Dead-end Cell




**شکل ۲** شماتیک سیستم فیلتراسیون غشایی

در ابتدا غشاها را به‌صورت دایره‌ای شکل با قطری برابر قطر خارجی ماژول برش زده و به‌صورتی درون غشاء قرار می‌دهیم که سطح جداساز در تماس با خوراک ورودی قرار بگیرد. غشاها به‌مدت 15 min با فشار 5 bar تحت عمل فشرده‌سازی قرار گرفتند. سپس، فشار عملیاتی برای فرآیندهای جداسازی به میزان 4/5 bar تغییر داده شد. شار آب خالص از رابطه ۳ محاسبه شد:

$$J_{w,1} \equiv \frac{V}{A \times t} \quad (۳)$$

در رابطه فوق A، V و t به‌ترتیب شار ماده عبوری از غشاء برحسب L، مساحت سطح مقطع غشاء برحسب $m^2$، زمان جداسازی برحسب h است. رابطه ۴ برای اندازه‌گیری میزان جداسازی استفاده شد [۲۹-۳۲]:

$$\text{Rejection}(\%) \equiv \frac{C_f - C_p}{C_f} \times 100 \quad (۴)$$

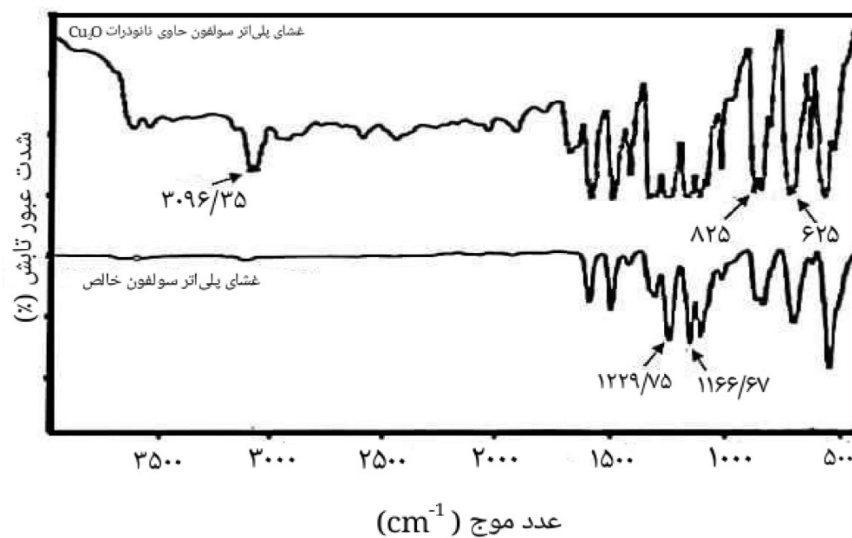
$C_f$ غلظت یون‌ها در خوراک و $C_p$ غلظت محلول عبوری از غشاء است. محلول کلرید منیزیم با غلظت 0/005 g/L به‌عنوان محلول خوراک برای بررسی عملکرد غشاهای تهیه شده استفاده شد.

## بحث ونتایج

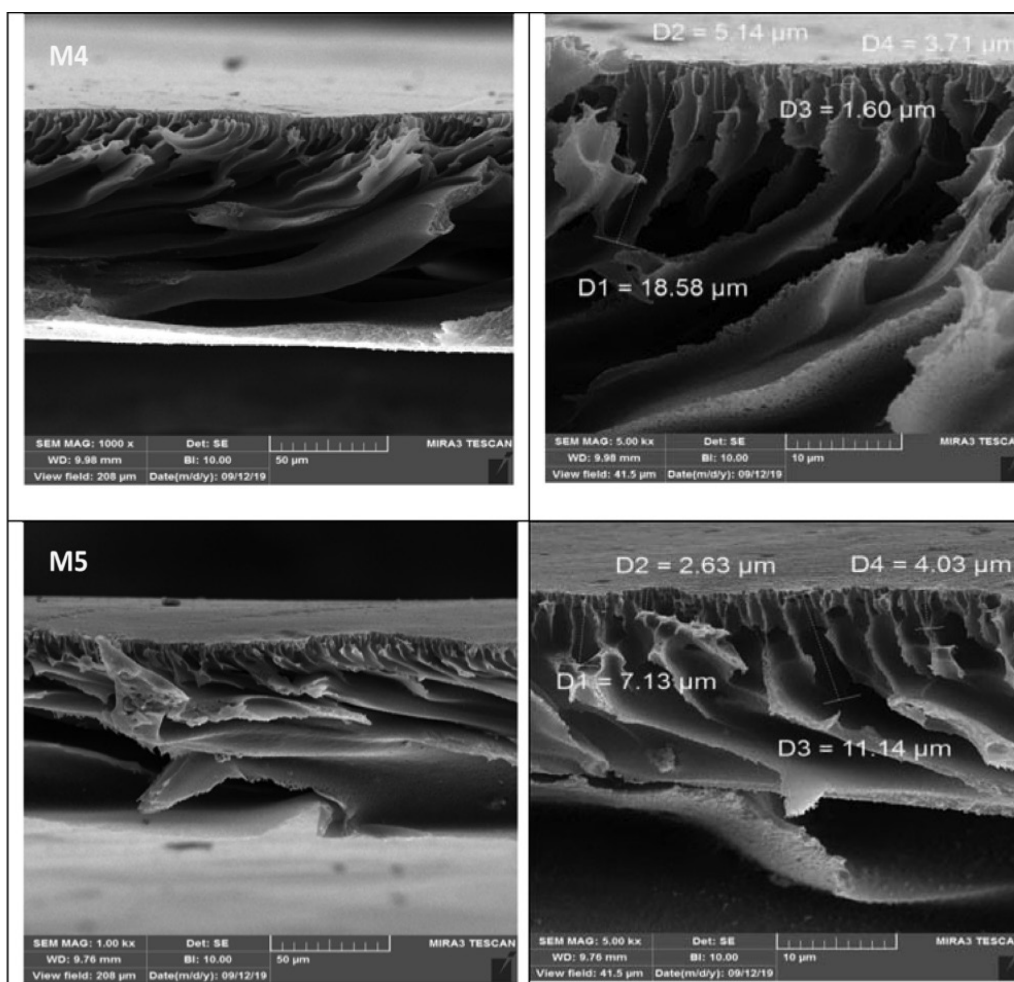
### مشخصات غشاء

نتایج آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز برای غشاهای ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است. آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز در محدوده $400-4000\ cm^{-1}$ انجام گرفت. پیک‌های مشخص شده در محدوده $500-600\ cm^{-1}$ مربوط به ارتعاشات اکسید فلزی است [۳۳ و ۳۴]. همچنین، باندهای مشخص شده در 828/07 و $621/35\ cm^{-1}$ مربوط به ارتعاشات کششی Cu-O و Cu-O-Cu است [۱۲ و ۱۳]. باندهای مشخص شده در $1166/67\ cm^{-1}$ مربوط به کشش متقارن در گروه S=O و $1229/75\ cm^{-1}$ برای کشش غیرمتقارن در گروه S=O است [۳۵]. پیک گسترده در محدوده $1579/68-1487/15\ cm^{-1}$ مربوط به حلقه بنزنی در غشای پلی‌اترسولفونی است [۳۶]. نانوذرات و غشاء پیک‌های جذب گسترده‌ای در محدوده $3068/77-3096/35\ cm^{-1}$ دارند که به گروه‌های عاملی هیدروکسیل گروه کششی O-H تعلق دارد که می‌تواند به‌دلیل ترکیب نانوذرات در ساختار غشاء باشد. در شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور بررسی مورفولوژی و پراکندگی نانوذرات، گرفته شد. بر طبق تصاویر نمونه‌های غشایی شامل یک ساختار نامتقارن با یک لایه بالایی جداساز متراکم و یک زیرلایه نگهدارنده متخلخل هستند [۳۷]. براساس نتایج آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز، نانوذره مس (I) اکسید به‌دلیل وجود اکسیژن در ساختار خود جزء نانو-ذرات آب‌دوست هستند.

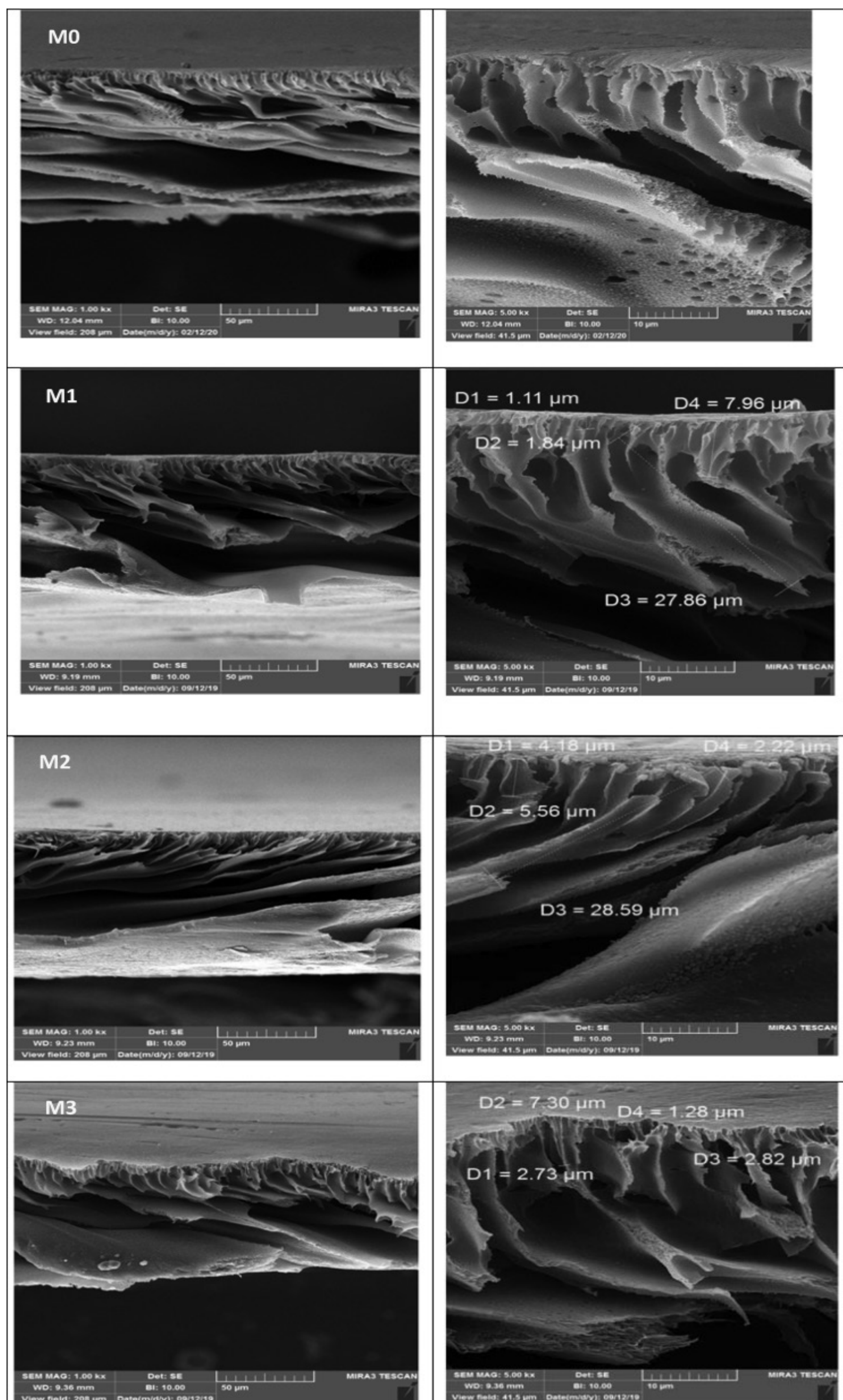
پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۹۰-۷۷




**شکل ۳** FTIR از غشای پلی‌اترسولفون خالص و حاوی نانوذرات مس (I) اکسید




**شکل ۴** ادامه در صفحه بعد



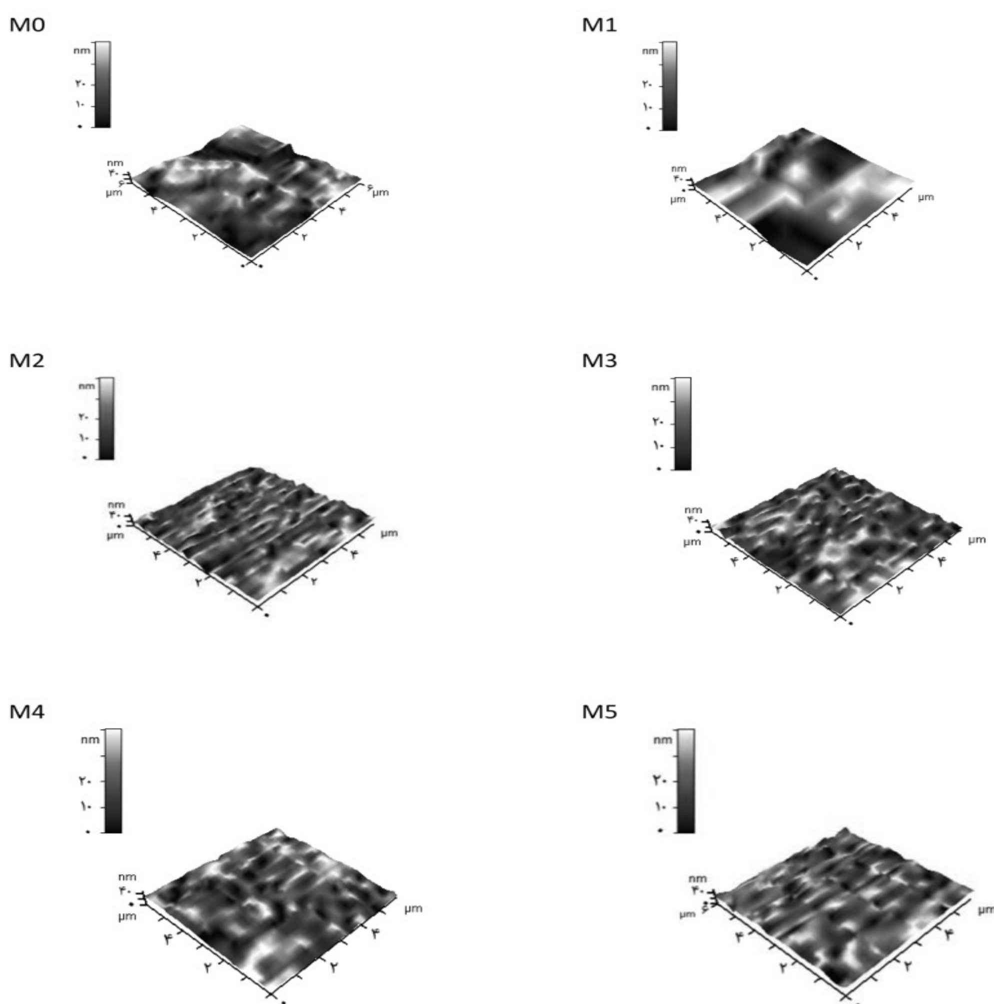

**شکل ۴** آنالیز FESEM از مقطع عرضی غشاهای ساخته شده خالص (M0) و غشاهای محتوی ۰/۰۵ (M1)، ۰/۱۰ (M2)، ۰/۵۰ (M3)، ۱ (M4) و ۲ (M5) درصد وزنی نانوذرات مس (I) اکسید

با حضور این نانوذرات در ساختار غشایی در حین فرآیند ساخت غشاء، میزان نفوذ جریان غیرحلال در فیلم پلیمری و خروج حلال افزایش می‌یابد. از این‌رو، باعث افزایش سرعت جدایش فازی می‌گردد. در نتیجه، حلال با سرعت بیشتری از فیلم پلیمری خارج می‌شود و زمان جدایش فازی محلول قالب‌گیری شده در داخل حمام آب، به شدت کاهش می‌یابد که اصطلاحاً به آن جدایش فازی آنی می‌گویند. سپس با خروج سریع حلال، لایه فعال بالایی غشاء به‌سرعت شکل می‌گیرد و منجر به یک مقاومت اضافی در برابر انتقال جرم می‌گردد و به‌دنبال آن زمان تبادل بین حلال و غیرحلال در زیرلایه غشاء افزایش می‌یابد و به همین دلیل، حفرات در زیرلایه از حالت اسفنجی[1] به ساختار انگشتی[2] تبدیل می‌شوند [۳۸ و ۳۹]. علاوه‌بر این، این امر باعث ایجاد حفرات در ساختار غشاء و در نتیجه افزایش تخلخل می‌شود [۴۰]. به‌طور کلی، افزودن نانوذرات باعث افزایش تخلخل و همچنین تغییر در شکل و اندازه حفرات لایه نگهدارنده شده است. با توجه به شکل ۴ با افزودن نانوذرات حفرات بزرگ‌تر و طویل‌تری در ساختار غشاء پدید آمده‌اند. همچنین حفرات در لایه جداساز تا غشای M 3 نسبت به غشای خالص بزرگ‌تر شده‌اند. با افزایش غلظت نانوذرات در غشاهای M 4 و M 5 اندازه حفرات کاهش یافته است که می‌تواند به‌علت تجمع و کلوخگی‌هایی باشد که برروی سطح غشاء اتفاق می‌افتد، که این امر می‌تواند ناشی از عدم پراکندگی یکنواخت نانوذرات در محلول پلیمری در هنگام قرار گرفتن در حمام اولتراسونیک باشد. همچنین، غلظت بالای نانوذرات منجر به افزایش فعل و انفعالات آن‌ها می‌شود در نتیجه نانوذرات به‌صورت یکنواخت پخش نشده و تجمع پیدا می‌کنند یا دلیل دیگر آن می‌تواند حرکت نانوذره‌ها به‌سمت سطح غشاء در حین فرآیند تغییر فاز باشد زیرا مقادیر اضافی از نانوذرات منجر به کاهش مسیر عبور آب و نمک شده و می‌توانند باعث ایجاد پدیده پرشدن حفرات گردد. در نتیجه می‌توانند اثر منفی بر شار عبوری از غشاء بگذارد که این علت کاهش شار در غشاها می‌باشد [۴۱ و ۴۲]. کاهش تخلخل در غشاهای M 4 و M 5 می‌تواند به‌دلیل انباشت نانوذرات و پراکندگی کم آن‌ها در غلظت‌های بالا باشد [۳۸].

**زبری سطح غشاهای ساخته شده**

برای بررسی بیشتر مورفولوژی سطح، از غشاها آنالیز زبری سطح با استفاده از تصاویر سه بعدی سطح انجام گرفت که در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. پارامترهای زبری از جمله میانگین زبری ($R_a$) و میانگین مربعات ریشه ($R_q$) غشاها و ماکزیمم زبری ($R_{max}$) اندازه‌گیری شد که در جدول ۲ ارائه شده است. هرچه سطح غشا صاف‌تر باشد غشا آب‌دوست‌تر است اما هرچه سطح غشا زبرتر باشد تمایل بیشتری به رسوب ذرات موجود در خوراک دارد که در پستی و بلندی‌های موجود در سطح تجمع کرده و باعث ایجاد گرفتگی در سطح غشا می‌شوند و میزان شار عبوری را کاهش می‌دهند [۱ و ۱۱]. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزودن نانوذرات در ساختار غشا میزان زبری سطح کاهش یافته و سطح غشاهای حاوی نانوذرات نسبت به غشای خالص صاف‌تر شده است. در M1 با ۰/۰۵٪ وزنی نانوذرات، میزان زبری سطح غشا کاهش یافته است بنابراین، غشا آب‌دوست‌تر شده است. در M2 با ۰/۱٪ وزنی میزان زبری به مقدار کمی افزایش یافته که می‌تواند به‌دلیل وجود نانوذرات در سطح و حرکت و تجمع آن‌ها در حین فرآیند تغییر فاز باشد. در M3 و M4 می‌توان گفت توزیع یکنواخت نانوذرات درسطح به گونه‌ای است که نانوذرات حفره‌های سطح را پر کرده و سطح را صاف‌تر کرده‌اند [۱۱]. زبری سطح در M5 مجدداً افزایش می‌یابد. در نمونه‌های غشایی که غلظت نانوذرات در آن‌ها بالا است.

1. Sponge-like
2. Finger-like




**شکل ۵** عکس‌های میکروسکوپ نیروی اتمی از سطح غشاهای خالص و حاوی غلظت‌های مختلفی از نانوذرات مس (I) اکسید.

**جدول ۲** مقدار پارامترهای زبری غشاهای ساخته شده.

| شماره غشا | $R_a$ (nm) | $R_q$ (nm) | $R_{max}$ (nm) |
|---|---|---|---|
| M0 | ۴/۶۲ | ۵/۵۹ | ۲۳/۸ |
| M1 | ۴/۲۶ | ۵/۰۷ | ۱۶/۹ |
| M2 | ۴/۴۸ | ۳/۷۷ | ۲۷/۱۶ |
| M3 | ۳/۷۸ | ۴/۵۴ | ۱۸/۴۶ |
| M4 | ۲/۳۵ | ۳/۰۲ | ۱۳/۶۱ |
| M5 | ۳/۰۲ | ۴/۰۵ | ۲۰/۷۱ |

همان‌طور که گفته شد در هنگام فرآیند تغییر فاز، مقدار زیادی از نانوذرات به‌سمت سطح غشا حرکت کرده و در آنجا تجمع می‌کنند. به همین علت افزایش زبری سطح در M5 می‌تواند ناشی از کلوخگی و تجمع و انباشت ذرات روی سطح غشا باشد.

**عملکرد فیلتراسیون غشاها**

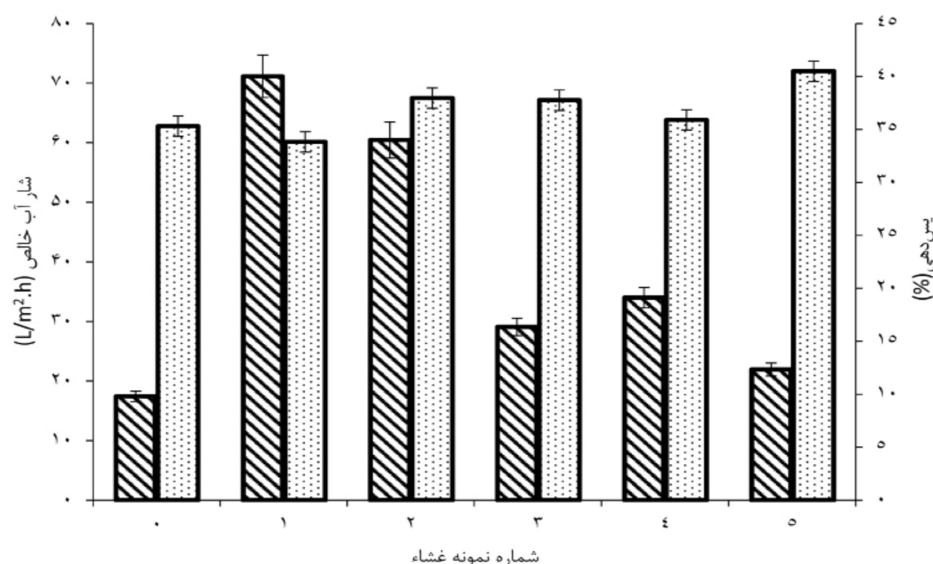
عملکرد فیلتراسیون غشاها وابسته به ساختار و آب‌دوستی غشاها است. جدول ۳ نشان‌دهنده روند تغییرات شار آب خالص عبوری از غشا می‌باشد.

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۹۰-۷۷

**جدول ۳** نتایج شار آّب خالص غشاهای ساخته شده.

| شماره غشاء | M0 | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| شار آب خالص (نماد واحد) | ۹/۸ | ۳۶/۷۸ | ۲۹/۴۹ | ۱۳/۷ | ۱۴/۶۱ | ۱۱/۷۵ |

همان‌گونه که مشخص است میزان شار آب خالص غشاهای حاوی نانوذرات نسبت به غشای خالص افزایش یافته که می‌توان گفت با افزودن نانوذرات میزان آب‌دوستی غشاء افزایش یافته که این سبب جذب آب و افزایش انرژی برهم‌کنش بین آب و غشاء و بهبود ترشوندگی می‌شود. همچنین، میزان تخلخل غشاء نیز با افزایش غلظت نانوذرات افزایش یافت و به مقدار (۷۸٪-۵۴٪) رسید درحالی‌که مقدار آن ۵۲٪ برای غشای خالص بود [۴۳]. همچنین، تشکیل کانال‌های طویل و بزرگ نیز عامل دیگر بهبود شار آب خالص است [۴۴] . اما با افزایش غلظت نانوذرات میزان شار عبوری از غشاها کاهش یافت که می‌تواند به‌علت انسداد حفرات موجود در سطح غشاء در نتیجه پراکنده شدن نامناسب نانوذرات در سطح غشاء و کاهش سایز حفرات موجود در سطح غشاء باشد. دلیل دیگر نیز ممکن است گرفتگی حفرات توسط انباشت و کلوخگی نانو ذرات روی سطح غشاء و در ساختمان غشایی باشد که در این شرایط سطح فعال نانو ذرات کاهش می‌یابد [۴۵ و ۴۶]. در این شرایط کانال‌های انتقال مسدود شده و شار آب خالص را کاهش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است. بیشترین شار عبوری آب خالص به‌مقدار ۳۶/۷۸ و ۲۹/۴۶ $L/m^2.h$ مربوط به غشاهای ساخته شده M1 و M2 است، که به‌ترتیب دارای حفرات بزرگتری به‌میزان $۸/۳۷×۱۰^{-۹}$ و $۶/۰۳×۱۰^{-۹}$ m می‌باشند، که در مقایسه با سایر غشاهای ساخته شده توسط دیگران بهبود شار را به‌دنبال داشته است. شار عبوری و پس‌دهی نمک از مهم‌ترین ویژگی‌ها در تعیین عملکرد غشاها هستند. نتایج شار عبوری و پس‌دهی محلول نمکی $MgCl_2$ در شکل ۶ گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد کمترین میزان پس‌دهی نمک‌ها مربوط به غشای M1 و بیشترین میزان پس‌دهی برای محلول نمکی مربوط به غشای M5 می‌باشد که می‌تواند به‌دلیل تشکیل کانال‌های بهم پیوسته و شار آب خالص کمتر باشد. میزان شار عبوری محلول $MgCl_2$ از ۹/۸۱ به ۱۲/۳۴ $L/m^2.h$ افزایش و پس‌دهی نمک $MgCl_2$ از ۶۲/۷۸ به ۶۰/۱۴٪ برای غشای M1 نسبت به غشای خالص کاهش یافته است. این تغییرات به‌دلیل افزایش سایز حفرات است که منجر به افزایش شار و کاهش پس‌دهی می‌شود. میزان شار با افزایش غلظت نانوذرات کاهش یافته است که می‌تواند به‌علت کلوخگی و گرفتگی احتمالی غشاها با پرشدن حفرات توسط نانوذرات باشد. افزایش پس‌دهی در غلظت‌های بالا نانوذرات می‌تواند به دلایل زیر باشد: کاهش میانگین اندازه حفرات و اثر دونان بین یون‌ها با بار همنام با توجه به برهم‌کنش بین نانوذرات و غشاء. مس (I) اکسید با داشتن بارهای منفی ناشی از گروه عاملی هیدروکسیل باعث دفع یون‌های دوظرفیتی سولفات و تک‌ظرفیتی کلرید می‌شود. بنابراین، دافعه الکترواستاتیکی بین بارهای همنام منفی از سطح غشاء و یون کلرید ($Cl^-$) یکی از مهم‌ترین دلایل جداسازی است [۳۷]. پس با افزایش غلظت مس (I) اکسید، بار منفی سطح غشاء افزایش یافته و میزان جداسازی و دفع الکترواستاتیکی یون‌های سولفات و کلرید افزایش می‌یابد [۴۷]. به‌طور کلی، همه غشاهای تهیه شده به‌جز M1 دارای پس‌دهی نمک بالاتری نسبت به غشای پلی‌اترسولفون خالص هستند و این به‌دلیل بار منفی سطح غشاء است. میزان بالای شار عبوری در غشاهای M1 و M2 به‌علت افزایش سایز حفرات آن‌ها است [۴۲]. به‌طور کلی، اثر دونان و سازوکارجذب دو عامل مهم برای پس‌دهی محلول‌ها است.




**شکل ۶** شار عبوری و پس‌دهی محلول نمک $MgCl_2$.

گروه‌های هیدروکسیل با بار منفی روی سطح غشاء یون‌های تک‌ظرفیتی کلرید را دفع می‌کنند و پس‌دهی یون‌های $Mg^{2+}$ را افزایش می‌دهند. غشای M5 بیشترین پس‌دهی و کمترین شار آب خالص را به‌دلیل کانال‌های بهم پیوسته و طویل با توجه به تصاویر SEM ارائه کرده است. با افزایش غلظت نانوذرات میزان پس‌دهی افزایش پیدا کرده است که می‌تواند به‌علت حضور نانوذرات روی سطح غشاء در هنگام تغییر فاز و افزایش ضخامت لایه فعال باشد که مقاومت غشاء در برابر انتقال یون افزایش می‌دهد. علاوه‌بر این، بارهای منفی آب‌دوست نانوذرات و افزایش رطوبت‌پذیری سطح غشاء باعث توانایی بالاتر برای جذب یون‌ها مثبت و برخورد بیشتر یون‌های آب‌پوشی شده روی سطح غشاء می‌شود [۴۸ و ۴۹]. بنابراین افزایش اندازه حفرات، تخلخل و شار آب خالص بهبود یافته برای M1 ممکن است منجر به کاهش پس‌دهی یون‌های $Mg^{2+}$ شده باشد [۵۰-۵۲]. مقایسه عملکرد جداسازی در این مطالعه با دیگر مقالات چاپ شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که با توجه به فشار عملیاتی و مقدار نانوذرات استفاده شده، میزان فلاکس مناسبی از غشاهای محتوی نانوذرات اکسید مس تک ظرفیتی به‌دست می‌آید.

**جدول ۴** مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با مقالات چاپ شده دیگر.

| غشا | نانوذره | درصد وزنی نانوذره | فشار (bar) | فلاکس (L/m²h) | رفرنس |
|---|---|---|---|---|---|
| پلی‌اترسولفون | گرافن اکساید | ۰/۵ | ۵ | ۱۳/۹ | [۵۱] |
| پلی‌اترسولفون | گرافن اکساید | ۰/۰۷ | ۲۰ | ۹۹/۷ | [۵۲] |
| پلی‌اترسولفون | $rGO/TiO_2$ | ۰/۱۵ | ۵ | ۴۵ | [۵۳] |
| پلی‌اترسولفون | کربن نانوفایبر/کیتوسان | ۰/۵ | ۵ | ۱۳/۵۸ | [۵۴] |
| پلی اترسولفون | $Fe_3O_4$/PVP | ۰/۵ | ۴/۵ | ۹/۹۶ | [۵۵] |
| پلی اترسولفون | فریت کبالت/کربن اکتیو | ۰/۱ | ۵ | ۱۳/۲ | [۵۶] |
| مطالعه حاضر | اکسید مس تک ظرفیتی | ۰/۰۵ | ۴/۵ | ۳۶/۷۸ | - |

## نتیجه‌گیری

غشـاهای نانوفیلتراسـیون بـر پایـه پلی‌اترسـولفون بـا اسـتفاده از روش وارونگـی فـاز سـاخته شـدند و غلظـت مختلفـی از نانـوذرات مـس (I) اکسـید کـه بـا روش الکتروشـیمیایی سـنتز شـده بودنـد، در سـاختار غشـاء قـرار گرفتنـد. حضـور گروه‌هـای آب‌دوسـت نانـوذرات باعـث افزایـش قابـل توجهـی در شـار آب خالـص شـد. بیشـترین شـار آب خالـص توسـط غشـای M1 کـه دارای ۰/۰۵٪ وزنـی نانـوذره مـس (I) اکسـید و بالاتریـن پس‌دهـی نمـک توسـط غشـای M5 کـه دارای ۲٪ وزنـی نانـوذره مـس (I) اکسـید اسـت، به‌دسـت آمـد. شـار آب خالـص به‌دلیـل وجـود گروه‌هـای آب‌دوسـت و افزایـش انـدازه متوسـط حفـرات و تخلخـل، افزایـش یافـت. همچنیـن افزایـش پس‌دهـی می‌توانـد مربـوط بـه ایجـاد بیشـتر سـایت‌های فعـال جـذب کلریـد منیزیـم و وجـود بـار منفـی بـرای دفـع $Cl^-$ باشـد.

## مراجع

[1]. Bandehali S, Parvizian F, Ruan H, Moghadassi A, Shen J, Figoli A, Adeleye A S, Hilal N, Matsuura T, Drioli E (2021) A planned review on designing of high-performance nanocomposite nanofiltration membranes for pollutants removal from water, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 78-125.
[2]. Van der Bruggen B, Vandecasteele C (2003) Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry, Environmental pollution, 435-445.
[3]. Yaser A Z (2011) Development of integrated nanofiltration system for highly concentrated dye removal, Doctoral dissertation, Swansea University, 1-79.
[4]. Staude E (1992) Marcel mulder: basic principles of membrane technology, kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 96: 741-742.
[5]. Mulder J (2012) Basic principles of membrane technology, Springer Science and Business Media.
[6]. García A, Rodríguez B, Oztürk D, Rosales M, Diaz D, Mautner A (2018) Incorporation of CuO nanoparticles into thin-film composite reverse osmosis membranes (TFC-RO) for antibiofouling properties, Polymer Bulletin, 75: 2053-2069.
[7]. Hosseini S, Afshari M, Fazlali A, Farahani S K, Bandehali S, Van der Bruggen B, Bagheripour E (2019) Mixed matrix PES-based nanofiltration membrane decorated by ($Fe_3O_4$–polyvinylpyrrolidone) composite nanoparticles with intensified antifouling and separation characteristics, Chemical Engineering Research Design, 147: 390-398.
[8]. Hwang J, Ejsmont A, Freund R, Goscianska J, Schmidt B V, Wuttke S (2020) Controlling the morphology of metal–organic frameworks and porous carbon materials: Metal oxides as primary architecture-directing agents, Chemical Society Reviews, 3348-3422.
[9]. Hashmi M, Ullah S, Kim I S (2019) Copper oxide (CuO) loaded polyacrylonitrile (PAN) nanofiber membranes for antimicrobial breath mask applications, Current Research in Biotechnology, 1-10.
[10]. Zhou H, Kang L, Zhou M, Zhong Z, Xing W (2018) Membrane enhanced COD degradation of pulp wastewater using $Cu_2O/H_2O_2$ heterogeneous Fenton process, Chinese Journal of Chemical Engineering, 26, 9: 1896-1903.
[11]. Zareei F, Hosseini S M (2019) A new type of polyethersulfone based composite nanofiltration membrane decorated by cobalt ferrite-copper oxide nanoparticles with enhanced performance and antifouling property, Separation Purification Technology, 226: 48-58.
[12]. Singh R, Yadav V, Purkait M K (2019) Cu2O photocatalyst modified antifouling polysulfone mixed matrix membrane for ultrafiltration of protein and visible light driven photocatalytic pharmaceutical removal, Separation Purification Technology, 212: 191-204.
[13]. Xu Z, Ye S, Zhang G, Li W, Gao C, Shen C, Meng Q (2016) Antimicrobial polysulfone blended ultrafiltration membranes prepared with Ag/$Cu_2O$ hybrid nanowires, Journal of Membrane Science, 509: 83-93.
[14]. Nasrollahi N, Vatanpour V, Aber S, Mahmoodi N M (2018) Preparation and characterization of a novel polyethersulfone (PES) ultrafiltration membrane modified with a CuO/ZnO nanocomposite to improve permeability and antifouling properties, Separation and Purification Technology 192: 369-382.
[15]. Yang H, Ouyang J, Tang A, Xiao Y, Li X, Dong X, Yu Y (2006) Electrochemical synthesis and photocatalytic property of cuprous oxide nanoparticles, Materials Research Bulletin, 1310-1318.
[16]. Valodkar M, Pal A, Thakore S (2011) Synthesis and characterization of cuprous oxide dendrites: New simplified green hydrothermal route, Alloys Compounds, 523-528.

[17]. Khattar H K, Al-Hasnawi S W R, Al-Saady F A (2015) Electrolytic prepa-ration and characterization of cuprous oxide nano powder, International Journal of Electrical Computer Sciences IJECS-IJENS, 6-12.
[18]. Sachin S S, Ashok D B, Chandrashekhar M M (2016) Synthesis of cuprous oxide (Cu2O) nanoparticles–a review, Journal Of Nano- And Electronic Physics, 8, (8,№ 1): 01035-1-01035-5.
[19]. Saeednia S, Iranmanesh P, Hatefi A M, Sinaei S (2015) Synthesis of cuprous oxide by thermal treatment in liquid paraffin. nanostructures, 5, 3: 297-303.
[20]. Ji J, Cooper W (1990) Electrochemical preparation of cuprous oxide powder: Part I. Basic electrochemistry, Journal of Applied Electrochemistry, 20, 5: 818-825.
[21]. Zhang N, Du Y L, Zhang Y, Wang C M (2011) A simple method for controlling the type of cuprous oxide semiconductors using different surfactants, Journal of Materials Chemistry, 21, 14: 5408-5413.
[22]. Valodkar M, Pal A, Thakore S (2011) Synthesis and characterization of cuprous oxide dendrites: New simplified green hydrothermal route, Alloys Compounds, 509, 2: 523-528.
[23]. Sandhya S U, Nityananda S A (2013) A facile one step solution route to synthesize cuprous oxide nanofluid, NanomaterialsNanotechnology, 3: 5.
[24]. Ji J, Cooper W C (1990) Electrochemical preparation of cuprous oxid powder: Part II. Process conditions, Journal of Applied Electrochemistry, 20, 5: 826-834.
[25]. Hwang G J, Ohya H, Nagai T (1999) Ion exchange membrane based on block copolymers, Part III: preparation of cation exchange membrane, Membrane Science, 156, 1: 61-65.
[26]. Khan J, Tripathi B P, Saxena A, Shahi V K (2007) Electrochemical membrane reactor: In situ separation and recovery of chromic acid and metal ions, Electrochimica Acta, 52, 24: 6719-6727.
[27]. Ghaemi N, Madaeni S S, Daraei P, Rajabi H, Shojaeimehr T, Rahimpour F, Shirvani B (2015) PES mixed matrix nanofiltration membrane embedded with polymer wrapped MWCNT: Fabrication and performance optimization in dye removal by RSM, Journal of Hazardous Materials, 298: 111-121.
[28]. Safarpour M, Vatanpour V, Khataee A (2016) Preparation and characterization of graphene oxide/$TiO_2$ blended PES nanofiltration membrane with improved antifouling and separation performance, Desalination, 393: 65-78.
[29]. Hu, L., et al., 2012. Preparation and performance of novel thermally stable polyamide/PPENK composite nanofiltration membranes. Applied Surface Science, 258(22): pp. 9047-9053.
[30]. Sivakumar, M., et al., 1998. Modification of cellulose acetate: Its characterization and application as an ultrafiltration membrane. applied polymer science, 67(11): pp. 1939-1946.
[31]. Gholami A, Moghadassi A R, Hosseini S M, Shabani S, Gholami F (2014) Preparation and characterization of polyvinyl chloride based nanocomposite nanofiltration-membrane modified by iron oxide nanoparticles for lead removal from water, Industrial Engineering Chemistry, 20, 4: 1517-1522.
[32]. Rajesh S, Senthilkumar S, Jayalakshmi A, Nirmala M T, Ismail A F, Mohan D (2013) Preparation and performance evaluation of poly (amide–imide) and $TiO_2$ nanoparticles impregnated polysulfone nanofiltration membranes in the removal of humic substances, Colloids Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, 418: 92-104.
[33]. Chang X, Wang Z, Quan S, Xu Y, Jiang Z, Shao L (2014) Exploring the synergetic effects of graphene oxide (GO) and polyvinylpyrrodione (PVP) on poly (vinylylidenefluoride)(PVDF) ultrafiltration membrane performance, Applied Surface Science, 316: 537-548.
[34]. Nasrollahi N, Atanpour V, Aber S, Mahmoodi N M (2017) Preparation and characterization of a novel polyethersulfone (PES) ultrafiltration membrane modified with a CuO/ZnO nanocomposite to improve permeability and antifouling properties, Separation and Purification Technology, 192: 369-382.
[35]. Abdul Mannan H, Mukhtar H, Shima Shaharun M, Roslee Othman M, Murugesan T (2016) Polysulfone/poly (ether sulfone) blended membranes for $CO_2$ separation, Journal of Applied Polymer Science, 133: 5.
[36]. Bandehali S, Parvizian F, Moghadassi A, Hosseini S M (2019) High water permeable PEI nanofiltration membrane modified by L-cysteine functionalized POSS nanoparticles with promoted antifouling/separation performance, Separation Purification Technology, 237: 116361.
[37]. Bagheripour E, Moghadassi A, Hosseini S M (2016) Preparation of mixed matrix PES-based nanofiltration membrane filled with PANI-co-MWCNT composite nanoparticles, Korean Journal of Chemical Engineering, 33, 4: 1462-1471.
[38]. Bandehali S, Moghadassi A, Parvizian F, Hosseini S (2019) A new type of [PEI-glycidyl POSS] nanofiltration membrane with enhanced separation and antifouling performance, Korean Journal of Chemical Engineering, 36, 10: 1657-1668.
[39]. Mansourpanah Y, Madaeni S S, Rahimpour A, Adeli M, Hashemi M Y, Moradian M R (2011) Fabrication new PES-based mixed matrix nanocomposite membranes using polycaprolactone modified carbon nanotubes as the additive: property changes and morphological studies, Desalination, 277, 1-3: 171-177.

[40]. Sivakumar M, Mohan D R, Rangarajan R (2006) Studies on cellulose acetate-polysulfone ultrafiltration membranes: II. Effect of additive concentration, Membrane Science, 268, 2: 208-219.
[41]. Hosseini S, Afshari M, Fazlali A R, Farahani S K, Bandehali S, Van der Bruggen B, Bagheripour E (2019) Mixed matrix PES-based nanofiltration membrane decorated by ($Fe_3O_4$–polyvi nylpyrrolidone) composite nanoparticles with intensified antifouling and separation characteristics, Chemical Engineering Research Design, 147: 390-398.
[42]. Bagheripour E, Moghadassi A R, Hosseini S M, Van der Bruggen B, Parvizian F (2018) Novel composite graphene oxide/chitosan nanoplates incorporated into PES based nanofiltration membrane: chromium removal and antifouling enhancement, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 62: 311-320.
[43]. Sianipar M, Kim S H, Iskandar F, Wenten I G (2017) Functionalized carbon nanotube (CNT) membrane: progress and challenges, RSC Advances, 7, 81: 51175-51198.
[44]. Ghaemi N, Madaeni S S, Alizadeh A, Rajabi H, Daraei P (2011) Preparation, characterization and performance of polyethersulfone/organically modified montmorillonite nanocomposite membranes in removal of pesticides, Journal of Membrane Science, 382, 1-2: 135-147.
[45]. He Y, Tang Y P, Chung T S (2016) Concurrent removal of selenium and arsenic from water using polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS)–polyamide thin-film nanocomposite nanofiltration membranes, Industrial Engineering Chemistry Research, 55, 50: 12929-12938.
[46]. Zhao Y, Yuan Q (2006) A comparison of nanofiltration with aqueous and organic solvents, Journal of membrane Science, 279, 1-2: 453-458.
[47]. Ghaemi N, Madaeni S S, Alizadeh A, Daraei P, Vatanpour V, Falsafi M (2012) Fabrication of cellulose acetate/sodium dodecyl sulfate nanofiltration membrane: characterization and performance in rejection of pesticides, Desalination, 290: 99-106.
[48]. Gueye M, Richardson Y, Kafack F T, Blin J (2014) High efficiency activated carbons from African biomass residues for the removal of chromium (VI) from wastewater, Environmental Chemical Engineering, 2, 1: 273-281.
[49]. Hosseini S, Ebrahimi M, Khodabakhshi A, Nemati M, Askari M (2019) Fabrication of mixed matrix ion exchange membrane by using activated carbon nanoparticles modified by chitosan: investigation of electrolyte concentration and ph effects on transfer properties, Journal of Petroleum Research, 29, 98-2: 72-83.
[50]. Fan L, Luo C, Sun M, Li X, Qiu H (2013) Highly selective adsorption of lead ions by water-dispersible magnetic chitosan/graphene oxide composites, Colloids Surfaces B: Biointerfaces, 103: 523-529.
[51]. Kyzas G Z, Kostoglou M, Lazaridis N K (2009) Copper and chromium (VI) removal by chitosan derivatives—Equilibrium and kinetic studies, Chemical Engineering Journal, 152, 2-3: 440-448.
[52]. Bandehali S, Moghadassi A, Parvizian F, Hosseini S M (2020) Mprovement in separation performance of PEI-based nanofiltration membrane by using functionalized titanium dioxide nanoparticles, Journal of Petroleum Research, 29, 109: 108-119.

# بررسی اثرات مقیاس pH و امواج فراصوت برپایداری نانوذرات مس اکسید درفرآیند جوشش استخری

محسن خوشه‌چین[1]، سهراب فتحی[2]، فرهاد سلیمی[1*] و اکبر محمدی دوست[1*]
۱- گروه مهندسی شیمی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران
۲- گروه مهندسی شیمی، دانشکده انرژی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

## چکیده

در این پژوهش آزمایشگاهی به بررسی افزایش ضریب انتقال حرارت در جوشش استخری نانوسیال با ذرات مس اکسید (CuO) با استفاده ازروش‌های تغییر pH و امواج فراصوت پرداخته شده است. نانوذرات موجب افزایش ضریب انتقال حرارت سیال پایه در فرآیند جوشش شده اما این مواد به‌علت عدم پایداری با افزایش دما و زمان، موجب رسوب بر سطح گرم‌کن و در نهایت موجب کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شوند. در نتیجه لازم است که غلظت بهینه نانوذرات در سیال به‌دست آید تا کمترین مقدار رسوبات تشکیل شود. بنابراین استفاده از روش‌هایی که منجر به کاهش رسوب نانوذرات برروی سطح شوند، مانند افزایش پایداری نانوذرات و استفاده از غلظت بهینه، می‌تواند ضریب انتقال حرارت را افزایش دهد. در این کار از دو روش پایداری نانوذرات در محلول یعنی تغییر pH (۹/۵، ۱۰ و ۱۰/۵) و تابش امواج فراصوت (با توان‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ از توان دستگاه فراصوت (۱/۲ kW)) استفاده شده است. نتایج کار به‌خوبی نشان داد که در غلظت wt.٪ ۰/۱۲۵ از محلول نانوسیال، بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت با تابش امواج فراصوت ( ۵۰٪ توان) برابر ۳۷/۴۸٪ و در تغییر اسیدیته محلول (pH=۱۰) برابر با ۲۲/۶۸٪ حاصل شد.

**کلمات کلیدی: نانوذرات، ضریب انتقال حرارت جوشش، امواج فراصوت، pH، رسوب**

## مقدمه

به‌علت وجود بحران انرژی (در تولیدازمنابع) در سراسر جهان، توجه بیشتری به‌سمت صرفه‌جویی در تولید و تبدیل انرژی به‌سایر انرژی‌های کارآمد و با صرفه اقتصادی جلب شده است. فرآیندهای تغییر فاز در انتقال حرارت یکی از روش‌های مؤثر در انتقال انرژی هستند که در آن انرژی با شار حرارت بالا و در قالب فرآیند تغییر فاز مایع به بخار و بالعکس رخ می‌دهد [۱]. فرآیند جوشش استخری با تغییر فاز قادر به انتقال شارهای حرارتی خیلی کم تا شارهای بسیار زیاد است.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی Ak.Mohammadidoust@iau.ac.ir
f.salimi@iauksh.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4710.3114)

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۱۲-۹۱

فرآیند جوشش استخری، در تجهیزات صنعتی مانند راکتورهای هسته‌ای، تراشه‌های الکترونیکی، دیگ‌های بخار و غیره، که در آن‌ها دست‌یابی به بالاترین میزان انتقال حرارت از اهمیت زیادی برخوردار است، نقش اساسی دارد [۲]. به‌طور کلی، دو روش برای افزایش کارایی در انتقال حرارت وجود داد که شامل روش‌های فعال و غیرفعال می‌باشند. در روش‌های فعال نیازمند یک نیروی خارجی مانند ارتعاشات مکانیکی [۳]، الکتروهیدرودینامیک (EHD)[1] [۴] وامواج فراصوت [۵] است. روش‌های غیرفعال نیز شامل تکنیک‌هایی می‌شود که درون محلول و سیستم (بعد از شروع فرآیند نمی‌توان بر فرآیند تغییر اعمال کرد) انجام می‌گیرد که شامل نوع محلول، جنس و هندسه سطح هستند. این تکنیک‌ها مانند نانوسیال [۶]، دستگاه‌های جریان چرخشی[2] [۷] و سطوح افزایش یافته [۸] می‌باشند. با توجه به هدایت حرارتی بالای نانوذره، اکثر نتایج نشان می‌دهند که نانوذرات می‌توانند عملکرد انتقال حرارت را در مایعات به طور چشم‌گیری افزایش دهند [۹]. اما نکته مهم در مورد افزودن نانوذرات فلزی، افزایش ویسکوزیته مایعات است که موجب افزایش هزینه‌های پمپاژ شده، و از طرفی نانوذرات به‌شدت تمایل به تهنشینی داشته که موجب کاهش میزان ضریب انتقال حرارت می‌شود. نانوذرات متداول درصنعت و آزمایشگاه‌ها شامل آلومینیوم اکسید ($Al_2O_3$)، مس (Cu)، مس اکسید (CuO)،کاربیدسیلیکون (SiC)،کاربیدتیتانیوم (TiC) می‌باشند. نانوذرات فلزی یا اکسید آن‌ها می‌توانند با خواص خود که شامل بالا بودن ضریب هدایت [۱۰ و ۱۱]، افزایش نیروی براونین[3] در کنار کم بودن ویسکوزیته نسبت به اندازه ذرات در مقیاس میکرومتر، باعث افزایش چشم‌گیری در ضریب انتقال حرارت مخصوصاً در مبدل‌های حرارتی شوند، که این افزایش موجب کاهش در اندازه ساخت تجهیزات گران قیمت می‌شود. اگرچه ذرات در اندازه نانو به‌طور چشم‌گیری مشکل کلوخه شدن و تهنشینی را کاهش می‌دهند، اما جز لاینفک در کاهش هدایت حرارتی نانوسیال است .برخی از محققین تأکید دارند که تجمع ذرات و تشکیل خوشه‌های[4] نانوذرات باعث کاهش در پایداری نانوسیال می‌شوند [۱۲ و ۱۳]. مادامی که در فرآیند جوشش، تبخیر در میکرولایه‌ها باعث حفظ و ادامه فرآیند می‌شود، غلظت نانوذرات در این نواحی و پس از جدا شدن هر حباب از سطح، افزایش یافته و موجب رسوب سریع نانوذرات برروی سطح انتقال حرارت می‌شود. این سازوکار باعث می‌شود تشکیل رسوب در فرآیند جوشش اجتناب‌ناپذیر باشد [۱۴]. هدایت حرارتی نانوسیال‌ها تابع فاکتورهایی مانند شکل، اندازه و پایداری نانوذرات، نوع سیال پایه استفاده شده، غلظت نانوذرات و دمای محلول است [۱۵]. روش‌های متداول برای پایداری نانوسیالات شامل افزودن سورفکتانت، تغییر pH محلول و تابش امواج فراصوت هستند [۱۶]. پراکندگی مناسب نانوذرات در سوسپانسیون را می‌توان با افزایش چگالی بار سطحی (جهت تولید نیروهای دافعه قوی) به‌دست آورد. به‌طور کلی، نانوسیال نباید در نقطه ایزوالکتریک (IEP) قرار داشته باشد. نقطه ایزوالکتریک نقطه‌ای است که در آن مولکول یا ذره دارای بار الکتریکی سطحی خالصی نباشد. در این حالت، پدیده‌های الکتروسینتیکی از بین می‌روند. در صنعت هر دو روش تغییر pH محلول و افزودن سورفکتانت برای دور شدن از نقطه ایزوالکتریک به‌کار می‌برند. براساس نظریه Derjaguin– Landau– Verwey– Overbeek [۱۷]، کنترل کردن pH در محلول یک روش مناسب برای پراکندگی نانوذرات در محلول است. زمانی‌که pH مساوی یا نزدیک به نقطه IEP است، نانوذرات تمایل به ناپایداری دارند و در نتیجه خوشه‌هایی از ذرات تشکیل و رسوب می‌کنند.

1. Electro Hydrodynamic
2. Swirl Flow Device
3. Brownian Motion
4. Cluster

به‌طور خلاصه در نقطه ایزوالکتریک، نیروی دافعه بین ذرات به کمترین مقدار خود می‌رسد. گودرزی [۱۸] نشان داد که با تغییر pH نانوسیال $CuO-H_2O$ و دور شدن از نقطه ایزوالکتریک نانوذرات (به‌دلیل اینکه نانوسیال‌ها اسیدی یا بازی‌تر می‌شوند)، بازده انتقال حرارت افزایش می‌یابد. سرافراز [۱۹] نشان داد که برای نانوذرات CuO محلول درآب، نقطه ایزوالکتریک در pH= ۸/۳۳ بوده، بنابراین برای تثبیت نانوسیال CuO، pH سوسپانسیون باید تاجایی‌که امکان دارد کمتر یا بیشتر از ۸/۳۳ باشد که در نهایت pH برابر با ۱۰/۲ را به‌عنوان بهترین مقدار برای پایداری نانوذرات CuO اعلام کرد. از طرفی، پیغمبرزاده [۲۰] در آزمایش‌های خود بیان کرد که pH برابر ۱۰/۱، نانوذرات CuO را در محلول به پایدارترین حالت می‌رساند. روش سوم در پایداری نانوذرات استفاده از امواج فراصوت است که از آن برای شکست یا ضعیف‌کردن نیروی جاذبه واندروالسی در سطح تماس بین ذرات می‌توان استفاده کرد. درصورتی‌که امواج فراصوت نتوانند کلوخه شدن نانوذرات را به‌طور کامل در هم بشکنند، اما با تبدیل آن‌ها به تراکم‌های کوچک‌تر، موجب افزایش پایداری در نانوسیال می‌شوند [۲۱]. البته کاهش رسوبات یا شکستن کلوخه ها به قدرت و مدت زمان تابش امواج فراصوت بستگی دارد. محبوبول [۲۲] مشاهده کردکه پراکندگی نانوذرات با افزایش زمان تابش امواج فراصوت، هدایت حرارتی بالاتر و ویسکوزیته پایین‌تری حاصل می‌گردد. امواج فراصوت با شدت بالا در محلول انتشار پیدا کرده و باعث کاویتاسیون می‌شود [۲۳]. حباب‌هایی که در اثر کاویتاسیون تولید شده، طی چندین دوره رشد می‌کنند و بعد از رسیدن به قطر بحرانی خود متلاشی می‌شوند [۲۴]. اثر مثبت کاویتاسیون ناشی از امواج فراصوت برروی انتقال حرارت جامد- مایع قبلاً توسط کیم بررسی شده است [۲۵]. از طرفی، تابش امواج فراصوت با جلوگیری از نشست ذرات برروی سطح گرم‌کن، مانع از مسدود شدن نقاط فعال مولد حباب می‌شود [۲۶]. امواج فراصوت را می‌توان به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم اعمال کرد. در روش مستقیم برای انتشار امواج، پراب را به‌صورت غوطه‌وردر محلول قرار داده، ولی در روش غیرمستقیم ظرف حاوی نمونه را داخل حمامی از مایع قرار داده و سپس امواج از داخل مایع به ظرف نمونه تابانده می‌شود [۲۷]. مشکل اصلی نانوذرات عدم پایداری آن‌ها در محلول و تمایل به ته‌نشینی است که موجب رسوب بر سطح انتقال حرارت، و در نتیجه کاهش میزان انتقال حرارت می‌شوند. در این مطالعه آزمایشگاهی هدف بررسی افزایش ضریب انتقال حرارت به‌وسیله افزودن نانوذرات به محلول در جوشش استخری ( رژیم هسته‌ای و ناحیه اشباع) و همچنین پایداری نانوذرات با اعمال امواج فراصوت و تغییرات pH محلول است. واضح است که دو روش ذکر شده جزء روش‌های پایداری نانوسیالات می‌باشند، اما در جوشش استخری به‌علت تولید حباب برروی سطح انتقال حرارت، پایداری پیچیده و متفاوت‌تر می‌شود زیرا هنگام تولید و جدایش حباب‌ها از روی سطح انتقال حرارت، نانوذرات معلق در محلول به محض جدا شدن هر حباب از سطح انتقال حرارت برروی سطح نشسته و رسوب می‌کنند. بنابراین لازم است بررسی شود که کدامیک از دو روش موجود، موجب کاهش رسوبات و افزایش میزان انتقال حرارت می‌شود. به‌طور کلی، باید مشخص شود کدام روش پایداری برای نانوذرات در جوشش استخری، عملکرد بهتری داشته بدون اینکه باعث به‌وجود آمدن مشکلات و موانعی برای افزایش میزان انتقال حرارت شود. اصلی‌ترین تفاوت این کار با دیگر تحقیقات را می‌توان در بهینه کردن جزء به جزء پارامترهای تأثیرگذار نانوذرات، امواج فراصوت و همچنین مقیاس pH محلول ذکر نمود. تأثیرگذاری امواج مافوق صوت و مقیاس pH بر پایداری نانوذرات و در نهایت مقایسه این دو از دیگر نوآوری‌های این کار می‌باشد.

در ادامه، به بررسی مهم‌ترین مدل‌های پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت پرداخته شده است. روزنو [۲۸] مدل خود را بر این فرض که حرکت حباب‌ها از ابتدای ترک سطح انتقال حرارت، بیشترین اهمیت را دارا هستند، ارائه نمود. کوتاتلادزه [۲۹] مدل خود را بااستفاده از دو پارامتر بدون بعد و بدون لحاظ کردن زبری سطح انتقال حرارت محاسبه و ارائه داد. استفان [۳۰] معادل خود را با استفاده از برازش چندگانه و با تحلیل و به‌کارگیری ۵۰۰۰ نتایج آزمایشگاهی از ۷۲ مقاله، برای سطوح افقی و تحت فشار اتمسفریک به‌دست آورد. گارنفلو [۳۱] با بررسی و تحلیل آزمایش های بی‌شمار و حجم زیادی از داده ها، مدل خود را ارائه کرد. مدل گارنفلو تابعی از زبری سطح Rp، فشارکاهیده و شار حرارتی است. علوی فاضل [۳۲] با مطالعات آزمایشگاهی برروی محلول‌های خالص (مانند آب دی‌یونیزه و مایعات الکلی) با استفاده از اصل حالات متناظر و آنالیز ابعادی مدل خود را ارائه نمود. این مدل‌های ریاضی در جدول ۱ آورده شده است.

## مواد و روش‌ها

### دستگاه آزمایشگاهی

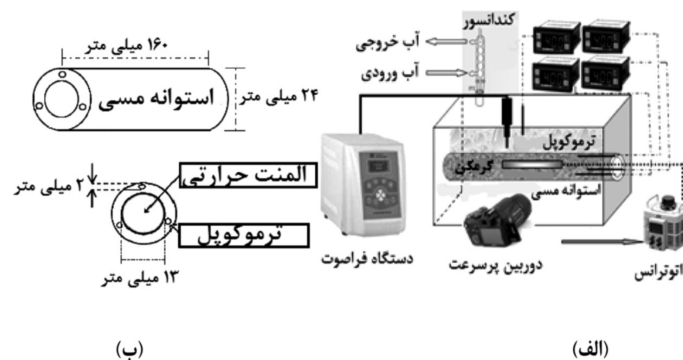
سیستم مورد مطالعه از یک ظرف مکعب شکل از جنس شیشه‌ای (آکواریوم) به ضخامت ۱۰ mm که دارای مقاومت حرارتی بالا و ابعاد ۱۸۰، ۹۰ و ۳۵۰ mm که به‌ترتیب طول، عرض و ارتفاع می‌باشند، ساخته شده است. در مرکز این ظرف از یک استوانه‌ای توخالی از جنس مس به قطر خارجی، قطر داخلی و طول به‌ترتیب ۲۴، ۱۳ و ۱۶۰ mm و با زبری متوسط سطح ۰/۸۴ µm به‌عنوان گرم‌کن تعبیه شده است. جهت تولید حرارت، داخل استوانه یک لامپ مدادی به قطر و طول به‌ترتیب ۱۱ و ۱۶۰ mm با توان حداکثر ۱ kW قرار داده شده است. همچنین برای تغییر در ولتاژ ورودی به لامپ، از یک اتوترانس با توان ۱ kW که قادر به تغییر ولتاژ در بازه ۳۰۰ V -۰ است، استفاده گردیده است. دامنه ولتاژ ۱۰۰ V-۲۲۰ و به‌صورت پلکانی ۲۰ V افزایش یافت. پس از هر بار تغییر ولتاژ به سیستم اجازه داده شدکه از نظر تغییرات دمایی ایجاد شده پایدار شده (معمولاً بین ۲ تا ۳ min)، سپس نتایج را ثبت کرده و مجدد ولتاژ افزایش داده می‌شد. برای ثابت نگه‌داشتن حجم (۲ L) و غلظت محلول در حال جوشش از یک کندانسور دربالای آکواریوم جهت میعان کردن بخارات و برگشت به مخزن استفاده‌شده است. جهت ایجاد امواج فراصوت، از دستگاه USH 1200 Generator Ultrasonic Homogenizer با توان ۱/۲ kW و فرکانس ۲۴ kHz استفاده شد که جزئیات بیشتر در شکل ۱ قابل مشاهده است.

### سیستم اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری مقدار ولتاژ و آمپر مصرفی از یک مولتی‌متر در محدوده ۱ mV~۱۰۰۰ V و ۰/۱~µA ۲۰ A استفاده شد. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد جهت ثبت تغییرات دمای ایجاد شده در سطح گرم‌کن، از سه عدد ترموکوپل در سه سوراخ ایجاد شده با زاویه °۱۲۰ نسبت به هم استفاده شده است. این سوراخ‌ها در نزدیک‌ترین فاصله ممکن به قطر خارجی استوانه یعنی ۱ mm قرار داده شده‌اند. قطر هر سوراخ ۲ mm و عمق آن نیز ۵۰ mm است. در درون هر سوراخ یک ترموکوپل نوع K با طول سنسور ۵۰ mm و قطر ۲ mm، با محدوده عملکرد ۱۸۰ °C- تا ۷۵۰ °C+ و دارای حساسیت ۴۱ $\mu V.{}^{\circ}C^{-1}$ قرار داده شد. صفحه نمایش دمایی که ترموکوپل‌ها به آن وصل شده تک کاناله، از نوع LCD و مدل آن HANYOUNG ED6-FKMAP4 با دقت خواندن دما به‌صورت اعشاری و با خروجی ۵ A می‌باشد. برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی محلول نانوسیال، از دستگاه KD2pro مدل DECAGON ساخت آمریکا که امکان اندازه‌گیری در محدوده ۵۰- تا ۱۵۰ °C+ دارا است، استفاده گردید. جهت اندازه‌گیری میزان pH محلول نیز از دستگاه pH متر مدل MI150 ساخت کمپانی Milwaukee ایتالیا استفاده شد.

**جدول ۱** روابط برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت جوشش استخری

| محقق | رابطه ریاضی مدل |
|---|---|
| روزنو [۲۸] | $\frac{h\beta'}{k}\left[\frac{gc\sigma}{g(\rho_l-\rho_v)}\right]^{\frac{1}{2}}=C_r\left[\frac{\beta'}{\mu}\left(\frac{g_c\sigma}{g(\rho_l-\rho_v)}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{q}{A}\right]^{\frac{2}{3}}\left(\frac{c\mu}{k}\right)^{-0.7}$ |
| کوتاتلادزه [۲۹] | $h=\left[3.37E-9\frac{k_l}{I^*}\left(\frac{H_{fg}}{C_{pl}(\frac{q}{A})}\right)^{-2}M^{*-4}\right]^{\frac{1}{3}}, M^{*-4}=\frac{\left(\frac{p}{\rho_v}\right)^2}{\frac{\sigma g}{\rho_l-\rho_v}}, I^*=\left[\frac{\sigma}{g(\rho_l-\rho_v)}\right]^{0.5}$ |
| استفان [۳۰] | آب<br>$\frac{hD_b}{k_l}=(0.24E+7)\left(\frac{qD_b}{Ak_l}\right)^{0.673}\left(\frac{h_{fg}D_b^{\,2}}{k_l^{\,2}}\right)^{-1.58}\left(\frac{T_{sat}D_bC_{pl}}{k_l^{\,2}}\right)^{1.26}\left(\frac{\rho_l-\rho_v}{\rho_l}\right)^{5.22}$<br>سیکل تبرید<br>$\frac{hD_b}{k_l}=267\left(\frac{qD_b}{Ak_lT_{sat}}\right)^{0.745}\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.581}\left(\frac{\alpha_l}{k_l}\right)^{0.533}$<br>شکل عمومی رابطه<br>$\frac{hD_b}{k_l}=0.23\left(\frac{qD_b}{Ak_lT_{sat}}\right)^{0.647}\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.297}\left(\frac{h_{fg}D_b^{\,2}}{\alpha^2}\right)^{0.371}\left(\frac{\rho_l\alpha^2}{\sigma D_b}\right)^{0.35}\left(\frac{\rho_l-\rho_v}{\rho_l}\right)^{-1.73}$ |
| گارنفلو [۳۱] | $\frac{h}{h_0}=\left(\frac{q}{q_0}\right)^{n(p_r)}F(p_r)\left(\frac{R_p}{R_{p0}}\right)^{0.133}$<br>$n(p_r)=0.9-0.3p_r^{\,0.3}, F(p_r)=1.73p_r^{\,0.27}+\left(6.1+\frac{0.68}{1-p_r}\right)p_r^{\,2}$ |
| علوی فاضل [۳۲] | $h=\frac{3.253\sigma^{0.125}h_{fg}^{\,0.125}\left(\frac{q}{A}\right)^{0.876}}{T_{sat}\alpha_l^{0.145}}$ |




(ب) (الف)

**شکل ۱** الف) شماتیک دستگاه آزمایشگاهی و ب) المنت گرمایشی

دستگاه حمام ویسکوزیته دو قلوکلاس A، مدل kp0312 شرکت کیان پژوهش‌گستر ساخت ایران با ۲ مخزن ۲۰ لیتری، دو عدد گرم‌کن برقی با توان‌های ۱۰۰۰ و W ۱۵۰۰، در محدوده °C ۲۰+ تا °C ۱۵۰+ و با حداکثر نوسان دما °C ۰/۰۲± به‌کار گرفته شد. این دستگاه همچنین دارای ۴ زمان‌سنج مستقل با دقت s ۰/۰۱است.

## شرح آزمایش‌ها

آزمایش‌ها ابتدا با آب دی یونیزه شده به‌عنوان محلول پایه به حجم L ۲ و سپس با اضافه کردن نانوذرات مس اکسید (CuO) با وزن مولی $g.\ mol^{-1}$ ۷۹/۵۵ و چگالی $g.\ cm^{-3}$ ۶/۴ ساخت کمپانی platonicnanotech کشور هند، انجام گرفت. مشخصات نانوذرات در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ذرات نزدیک به کروی با غلظت .wt.٪ ۰/۰۲۵ به آب دی‌یونیزه با سه اندازه ۲۰، ۴۰ و nm ۶۰ اضافه شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشند. پس از تعیین بهترین اندازه نانوذره جهت افزایش ضریب انتقال حرارت، در مرحله بعد جهت تعیین غلظت بهینه با افزایش درصد وزنی‌های نانوذرات، از .wt.٪ ۰/۰۲۵ تا .wt.٪ ۰/۱۲۵ با گام .wt.٪ ۰/۰۲۵ استفاده شد. در مراحل بعدی برای بررسی پایداری نانوسیال به‌ترتیب تغییر pH (استفاده از HCl و NaOH جهت تنظیم) و سپس امواج فراصوت به‌کار گرفته شد. قبل از استفاده از درصد وزنی‌های مختلف نانوسیال، محلول نانوسیال را جهت پراکندگی یکنواخت‌تر ذرات، حدود نیم ساعت در حمام فراصوت دیجیتال Elmasonic EP20H ساخت آلمان با فرکانس kHz ۳۷ قرار داده شد. برای اطمینان از قرار داشتن فرآیند در شرایط جوشش اشباع، در طول آزمایش‌ها به‌کمک ترموکوپل چهارم که در محلول قرار داده شد، شرایط اشباع بودن همواره کنترل گردید. همچنین در هر مرحله از آزمایش‌ها با استفاده از دوربین فیلم‌برداری پر سرعت Sony PMW-300K1 از تغییرات رخ داده در سطح گرم‌کن و محلول در حال جوشش فیلم گرفته شد. در نهایت اثرات و تغییرات دینامیک حباب ضبط و سپس با استفاده از نرم‌افزار EDIUS (نرم‌افزاری جهت ویرایش فیلم) تصاویر را آهسته تا تغییرات دینامیک حباب (فرکانس جدایش حباب، قطر جدایش حباب و نقاط مولد حباب) مشاهده و بررسی گردد. لازم به ذکر است که هر آزمایش حداقل ۵ بار تکرار شده و میانگین داده‌های آزمایشی لحاظ شد.

### عدم قطعیت

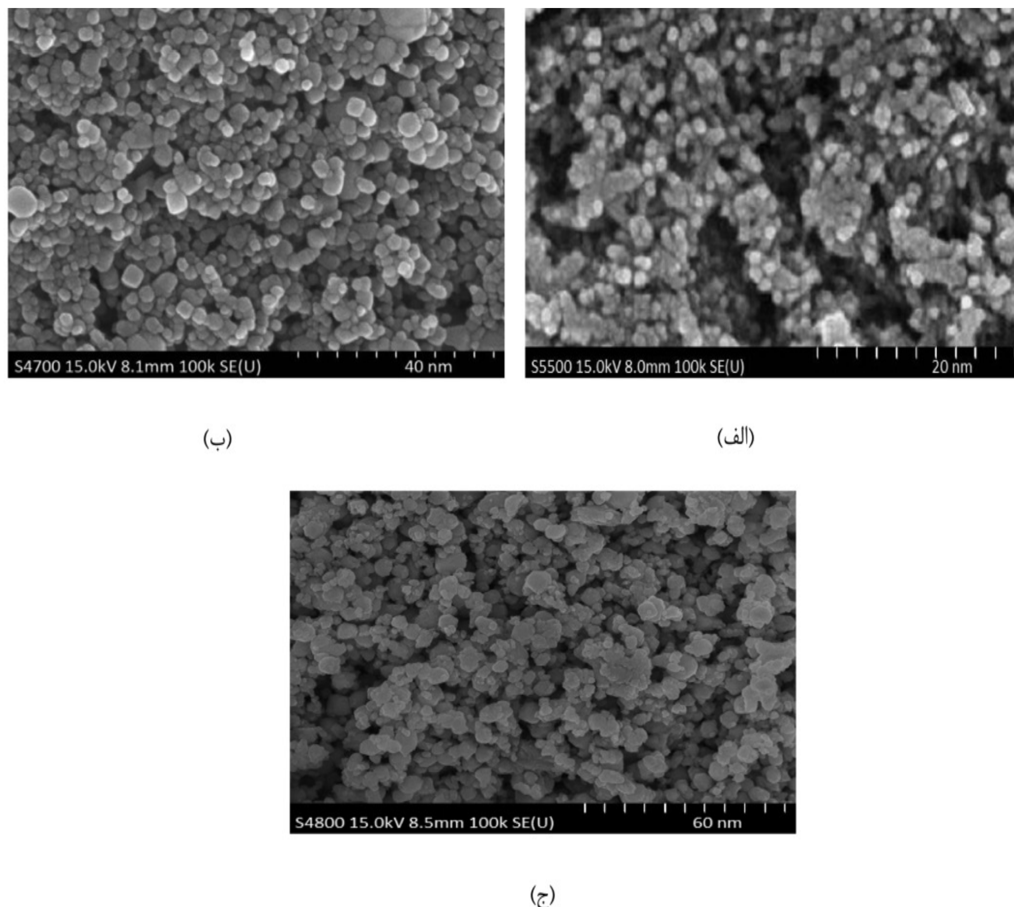
در این دستگاه، برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت از قانون سرمایش نیوتن به‌صورت زیر استفاده شد:

$$h = \frac{q / A}{(T_S - T_{Sat})} \qquad (۱)$$

که درآن $T_s$ دمای سطح انتقال حرارت، A سطح انتقال حرارت، h ضریب انتقال حرارت، q شار حرارتی و $T_{sat}$ دمای توده سیال است که روش اندازه‌گیری هر کدام بررسی می‌شود.

**جدول ۲** مشخصات نانوذرات مس اکسید.

| اندازه (nm) | جرم مولی $(g.\ mol^{-1})$ | چگالی $(g.\ cm^{-3})$ | رنگ | خلوص ٪ | فرمول شیمیایی | ماده |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۰، ۴۰ و ۶۰ | ۷۹/۵۵ | ۶/۴ | پودرسیاه | ۹۹/۹ | CuO | نانوذرات مس اکسید |




(الف) (ب)

(ج)

**شکل ۲** تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نانوذرات اکسیدمس: الف) مقیاس ۲۰ nm، ب) مقیاس ۴۰ nm و ج) مقیاس ۶۰ nm

از آنجا که گرم‌کن موجود در سیستم توان الکتریکی را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کند، مقدار شار حرارتی را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد [۳۳]:

$$q / A = IV / A(Cos\varphi) \qquad (۲)$$

سطح گرم‌کن نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A = \pi d.L \qquad (۳)$$

که در آن V، I و φ به‌ترتیب معرف اختلاف پتانسیل الکتریکی برحسب ولت، شدت جریان برحسب آمپر و φ اختلاف فاز بین اختلاف پتانسیل الکتریکی است (که اختلاف فاز بین اختلاف پتانسیل الکتریکی و شدت جریان ناچیز بوده عملا می‌توان Cosφ را برابر واحد در نظر گرفت). از آنجا که ثبت دقیق دمای سطح گرم‌کن توسط ترموکوپل برای تجزیه و تحلیل نتایج حائز اهمیت است و از طرف دیگر، مکان نصب ترموکوپل‌ها در فاصله کمی با سطح بیرونی گرم‌کن قرار دارند و این فاصله هر چند کوچک، باعث اختلاف دمای بسیار کمی شده که برای ثبت دقیق‌تر دما، از رابطه ۴ برای تصحیح این خطا استفاده شد:

$$T_S = T_{th} - \frac{q'' b_s}{k_s} \qquad (۴)$$

در این رابطه، $b_s$ فاصله بین محل‌های نصب ترموکوپل تا سطح انتقال حرارت و $k_s$، هدایت حرارتی سطح گرم‌کن است. میانگین درجه حرارت سه ترموکوپل ($\bar{T}_s$) از رابطه ۵ محاسبه گردید:

$$\overline{T_S} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} T_{S,i} \qquad (۵)$$

حداکثر عدم قطعیت تخمین‌زده شده برای شار حرارتی برابر است با:

$$\frac{\delta(q/A)}{q/A}=\sqrt{\left(\frac{\delta I}{I}\right)^2+\left(\frac{\delta V}{V}\right)^2} \quad (۶)$$

همچنین برای به‌دست آوردن مقادیر خطای اختلاف دمای سطح و محلول در حال جوشش (دمای سوپرهیت) و همچنین ضریب انتقال حرارت از رابطه‌های ۷ و ۸ استفاده شده است.

$$\delta\Delta T=\sqrt{(\delta T_S)^2-(\delta T_{th})^2} \quad (۷)$$

$$\frac{\delta h}{h}=\sqrt{\left(\frac{\delta I}{I}\right)^2+\left(\frac{\delta V}{V}\right)^2+\left(\frac{\delta T}{T}\right)^2} \quad (۸)$$

در جدول ۳ میزان عدم قطعیت دستگاه‌های اندازه‌گیری در این پژوهش آورده شده است.

**جدول ۳** منابع عدم قطعیت

| پارامتر | میزان عدم‌قطعیت |
|---|---|
| قطر و طول لوله | ± ۰/۰۱ mm |
| ترموکوپل K-type, | ± ۰/۱ °C |
| ولتاژ | ±٪۰/۱ V |
| جریان | ±٪۱ A |
| توان | ±٪۱/۵ W |
| شار حرارت ماکزیمم ۷۶ kW.m$^{-2}$ | ± ۱/۸۵۴۵ kW. m$^{-2}$ |
| ضریب هدایت حرارتی KD2 pro, | ٪۵ W.m$^{-1}$.K$^{-1}$ |
| زبری سنج | ± ٪۵ |

## نتایج و بحث

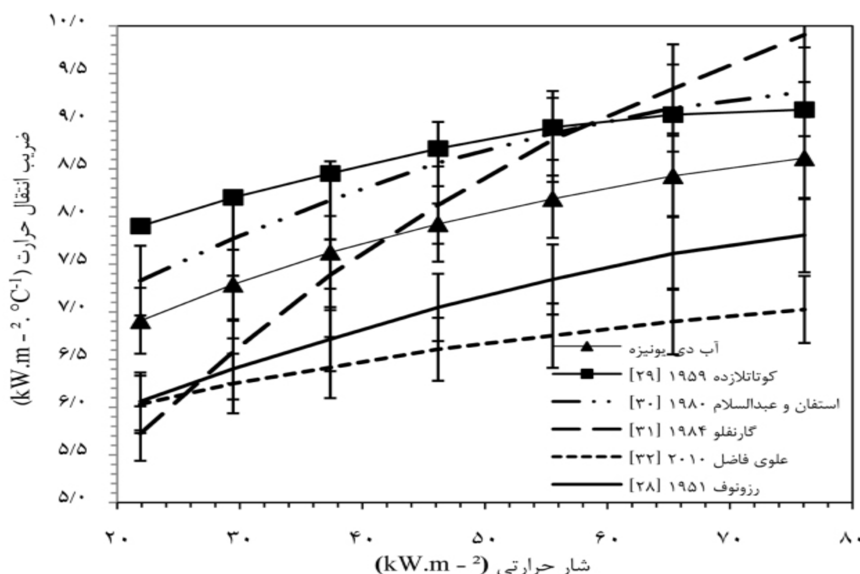
### مقایسه ضریب انتقال حرارت (BHTC) آزمایشگاهی با مدل‌های پیشین

برای صحت از عملکرد و درستی دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده قبل از شروع به آزمایش‌ها، چند تست برروی آب دی‌یونیزه به‌عنوان سیال پایه انجام گرفت. سپس نتایج را با مدل‌های موجود مقایسه و نتایج در شکل ۳ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد، که دستگاه مورد آزمایشگاهی در محدوده مناسبی از نتایج کار می‌کند. به نحوی که نتایج به‌دست آمده در مقایسه با مدل استفان و عبدالسلام با میانگین خطای ٪۱۰/۳ بیشترین همپوشانی یا کمترین خطا و با مدل علوی فاضل خطای ٪۱۶/۲ کمترین هم‌پوشانی را با نتایج آزمایشگاهی برای آب دی‌یونیزه داشته‌اند.

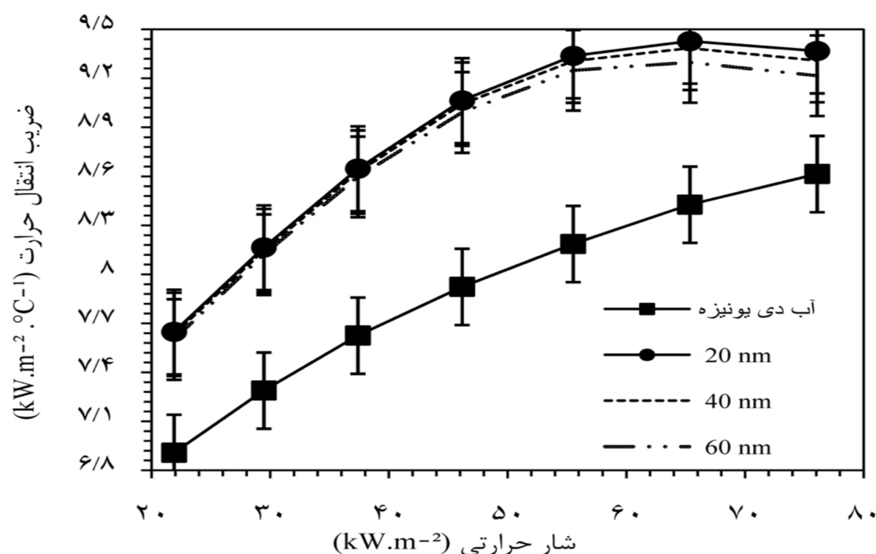
### پارامترهای نانوذرات

#### تاثیر اندازه نانوذره بر BHTC

در شکل ۴ مشاهده می‌شود در ابتدا به بررسی اثرات اضافه کردن نانوذرات CuO بر BHTC و شار حرارت بحرانی در سه اندازه‌۲۰، ۴۰ و ۶۰ nm در غلظت ثابت ٪.wt ۰/۰۲۵ در آب دی‌یونیزه به‌عنوان سیال پایه پرداخته شده است.




**شکل ۳** مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی با مدل‌های مرسوم نسبت به آب دی‌یونیزه.




**شکل ۴** تغییرات ضریب انتقال جوشش نانو مس اکسید با غلظت ٪ wt. ۰/۰۲۵ نسبت به آب دی‌یونیزه

با اضافه کردن نانوذرات CuO، افزایش چشم‌گیری در عملکرد BHTC نانوسیال، نسبت به آب دی‌یونیزه به‌دست آمده است. لو و همکاران [۳۴] در تحقیقات خود نشان دادند که با اضافه کردن نانوذرات CuO به آب دیونیزه، HTC [1] تا ۳۰٪ افزایش یافت. با مشاهده شکل ۴ افزایش BHTC در شارهای پایین تا حدود شار $kW.m^{-2}$ ۵۵ روندی صعودی داشته و پس از آن رفته‌رفته افت شدید می یابد. در ادامه به بررسی این افزایش و کاهش پرداخته می‌شود. همان‌طور که در بالا نیز اشاره شد افزودن ذرات فلزی در ابعاد نانومتر به‌علت داشتن هدایت حرارت بالا، باعث افزایش HTC می‌شود [۳۶ و ۳۵]. از طرفی، این افزایش فقط محدود به مقیاس در اندازه‌ی نانو نمی‌باشد، بلکه هر چه سایز ذرات در حد نانوذره باز هم کوچک‌تر شود، ضریب انتقال حرارت بیشتر و بیشتر می‌شود. نتایج نشان داده که در سایز nm ۲۰ با متوسط افزایش ٪۱۲/۱۷ و nm ۶۰ با متوسط افزایش ٪۱۱/۱۵ به‌ترتیب بیشترین و کمترین افزایش مشاهده شد. افزایش نیروی براونین [2] به‌دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی را می‌توان دلیل مهم در افزایش BHTC نام برد [۳۹-۳۷]. حرکات براونین تنها زمانی وجود دارد که ذرات با ابعاد بسیار کوچک در سیال حضور داشته باشند.

دلایل مهمی در کنار افزایش دما بر افزایش نیروی براونین نقش اساسی دارد. بیشتر شدن سطح ویژه باعث می‌شود سطح بیشتری برای تبادل حرارت در اختیار سوسپانسیون قرار گیرد (جدول ۴).

**جدول ۴** مقادیر سطح ویژه CuO

| قطر (nm) | ۲۰ | ۴۰ | ۶۰ |
|---|---|---|---|
| سطح مقطع ویژه ($m^2.g^{-1}$) | ~۳۵ | ~۲۰ | ~۱۸ |

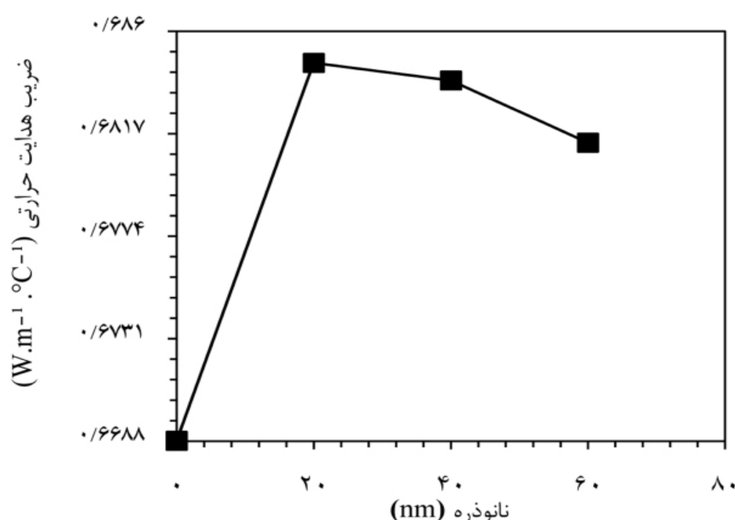
براساس نظریه انتشار اینشتین سرعت براونین نانوذرات با کاهش قطر نانوذرات تا حد زیاد افزایش می‌یابد [۴۰]. افزایش دما باعث افزایش حرکت ذرات می‌شود و از آنجایی که ذرات کوچک‌تر سریع‌تر نسبت به ذرات درشت‌تر حرکت می‌کنند، در نتیجه ذرات کوچک‌تر در سطح بالاتری از حرکت براونین نسبت به ذرات بزرگ‌تر قرار می‌گیرند [۳۵]. کاهش در اندازه ذرات موجب کاهش ویسکوزیته و در نهایت افزایش در میانگین سرعت حرکات براونین می‌شود، که چندین عامل مهم مانند کسرحجمی، اندازه ذرات، درجه حرارت مایع و اثر زیادی بر ویسکوزیته می‌گذارند [۴۰].

1. Heat Transfer Coefficient
2. Brownian Motion

شکل ۵ به بررسی تغییرات ضریب هدایت حرارت آب دی‌یونیزه و نانوذارات ۲۰، ۴۰ و ۶۰ nm در دمای ۱۰۰ °C می‌پردازد. از طرفی، افزایش هر چه بیشتر نیروی براونین نتیجه آن پایداری بیشتر نانوسیال است. پایداری نانوسیال موجب تشکیل رسوب کمتر بر سطح گرم‌کن می‌شود. از رسوب برروی سطح گرم‌کن باید اجتناب شود زیرا، هم باعث مسدود شدن چشمه‌های فعال مولد حباب[1] شده هم‌اینکه در بلند مدت با افزایش ضخامت خود بر سطح گرم‌کن مانند یک لایه عایق عمل کرده و موجب کاهش انتقال حرارت می‌شود. کوارک و همکاران نشان دادند که هم‌زمان با تبخیر میکرولایه‌ها در زیر حباب در حال رشد برروی سطح گرم‌کن و نهایتاً پس از جدا شدن حباب، نانوذرات به‌جای آن رسوب می‌کند [۴۱]. هر چند نتایج نشان دادند که کاهش هر چه بیشتر سایز نانوذرات به پایداری آن کمک می‌کند، اما در هر صورت رسوب به‌وجود آمده و باعث کاهش BHTC می‌شود. در بالا هم ذکر شد که هر سه نانوذره تا نزدیکی شار حرارتی ۵۵ $kW.m^{-2}$ عملکرد مشابه و تقریباً خطی در افزایش BHTC داشته‌اند اما بعد از آن در هر سه سایز نانوذرات ضریب انتقال حرارت افت پیدا کرده است. عامل اصلی این افت همان‌طور که گفته شد، به‌علت رسوب و کلوخه شدن نانوذرات در حین فرآیند است. تمایل ذرات در سیال به کلوخه شدن را می‌توان به دو دلیل مهم مرتبط دانست. اول به‌دلیل وجود نیروهای واندروالس، که به ویژه در ذرات فلزی بیشتر دیده می‌شود، چون دو قطبی[2] شدن یون‌ها می‌توانند به راحتی در مولکول‌های این ذرات رخ دهند. ایجاد دو قطبی باعث جذب دیگردو قطبی‌های مجاو می‌شود. نیروهای واندروالس از جاذبه این دو قطبی‌ها ناشی می‌شود. این نیروی جاذبه به‌عنوان عامل اصلی در تجمعات ذرات، به ویژه در نانوپودرها محسوب می‌شود [۴۲]. دوم اینکه با توجه به سطح انرژی بالای نانوذرات، به راحتی انعقاد پیدا می‌کنند و درنتیجه پراکنده کردن ذرات در مایع پایه دشوار شده که این امر می‌تواند سیستم را به‌سمت کلوئیدی برده و در نتیجه پایداری نانوذرات کم می‌شود [۴۳].

**تاثیر افزایش غلظت نانوسیال بر BHTC**

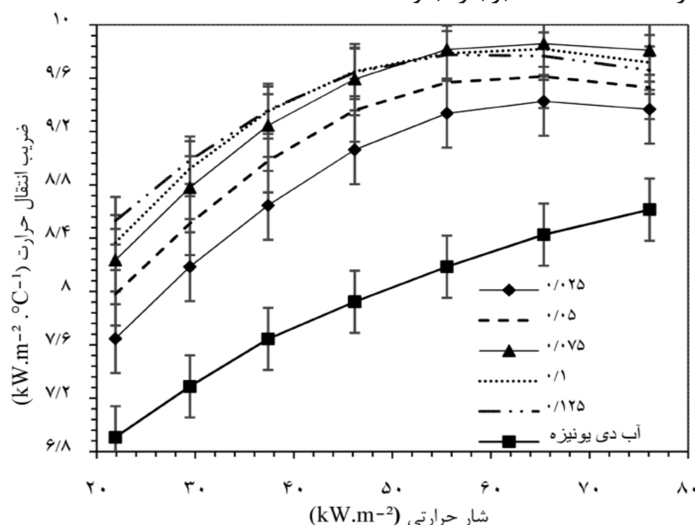
در بخش قبل نانوذره CuO در قطر ۲۰ nm به‌عنوان اندازه مطلوب در افزایش BHTC تعیین گردید.




**شکل ۵** تغییرات ضریب هدایت جوشش نانو CuO با غلظت ٪wt. ۰/۰۲۵ نسبت به آب دی‌یونیزه

1. Active Nucleation Sites Density
2. Dipoles

در ایـن بخـش بـا همیـن قطـر بـه بررسـی تأثیـرات افزایـش غلظت‌هـای مختلـف (۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱ و ۰/۱۲۵ wt.٪) پرداختـه شـد. شکل ۶ و جـدول ۵ نشان می‌دهـد کـه بـا افزایش غلظـت نانـوذرات از wt.٪ ۰/۰۲۵ تـا wt.٪ ۰/۱۲۵مقـدار BHTC پیوسـته افزایـش می‌یابـد. امـا ایـن رونـد افزایـش در شـارهای حرارتـی پاییـن بیشـتر بـوده و هـر چـه شـار حرارتـی افزایـش می‌یابـد، BHTC کاهـش پیـدا می‌کنـد. کاهـش BHTC بـا افزایش درصـد غلظـت وزنـی، بیشـتر و بیشـتر هـم می‌شـود به‌طوری‌کـه بعـد از غلظـت wt.٪ ۰/۰۷۵ BHTC در شـارهای پاییـن نیـز به‌شـدت افـت پیـدا می‌کنـد. علـت ایـن افزایـش و کاهش‌هـا را بایـد در عملکـرد ضریـب هدایـت حرارتـی جسـتجو کـرد. در بخـش قبـل ذکـر شـد کـه بـا افـزودن نانـوذرات، ضریـب هدایـت حرارتـی کـه مهم‌تریـن عامـل افزایـش BHTC اسـت، افزایـش می‌یابـد. در شـکل ۷ تغییـرات ضریـب هدایـت حرارتـی بـا افـزودن غلظـت نانـوذرات مشـاهده می‌شـود. در بررسـی افزایش غلظـت نانوسـیال و اثـر آن بـر افزایـش BHTC دو نکتـه وجـود دارد:اول اینکـه رونـد متوسـط افزایـش BHTC در همـه غلظت‌هـا برابـر نبـوده، به‌طوری‌کـه متوسـط ایـن افزایـش باتوجـه بـه جـدول ۵ از غلظـت wt.٪ ۰/۰۲۵ تـا wt.٪ ۰/۰۷۵ به‌صـورت متوسـط تقریبـا ۳/۴٪ افزایـش پیـدا کـرده و پـس از آن از wt.٪ ۰/۰۷۵ بـه wt.٪ ۰/۱ حـدوداً ۰/۵۴٪ افزایـش پیـدا کـرده و از wt.٪ ۰/۱ بـه wt.٪ ۰/۱۲۵ حـدوداً ۰/۲۸٪ افزایـش پیـدا کـرده اسـت. مطلـب دوم، افزایـش BHTC در تمـام غلظت‌هـا تـا حـدوداً شـار حرارتـی $55\ kW.m^{-2}$ صعـودی بـوده و پـس از آن رونـد نزولـی پیـدا کرده‌انـد. رونـد کاهـش BHTC بعـداز غلظـت wt.٪ ۰/۰۷۵ بـا شـدت بیشـتری افـت کـرده اسـت. در بررسـی علـت کاهـش BHTC در هـر دو قسـمت بـالا بایـد بـاز هـم بـه رسـوب و ته‌نشـینی نانـوذرات کـه مهمتریـن عامـل اسـت اشـاره کـرد. Patra و همـکاران [۴۴] نیـز دریافتنـد کـه BHTC در نانوسـیال بـا افزایـش غلظـت در شـارهای حرارتـی بـالا، کاهـش می‌یابـد به‌طوری‌کـه نانـوذرات بـا رسـوب بـر سـطح گرم‌کـن باعـث می‌شـوند کـه چشـمه‌های فعـال مولـد حبـاب پـر شـده و از طرفـی، افزایـش رسـوب مانـع رسـیدن مسـتقیم سـیال بـه سـطح گرم‌کـن و در نهایـت ماننـد یـک عایـق عمـل می‌کنـد.

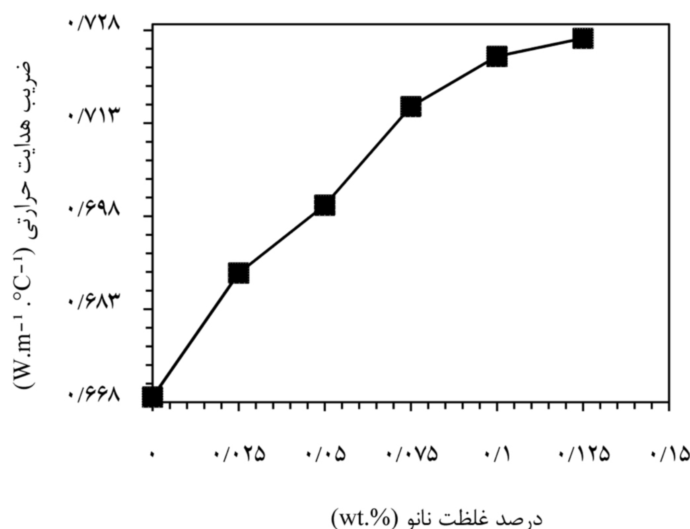



**شکل ۶** تغییرات BHTC نانو مس اکسید با درصدهای جرمی مختلف نسبت به آب دی‌یونیزه

**جدول ۵** متوسط تغییرات BHTC نانو CuO با غلظت مختلف نسبت به آب دی‌یونیزه

| درصد وزنی نانوذره | ۰/۰۲۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۷۵ | ۰/۱ | ۰/۱۲۵ |
|---|---|---|---|---|---|
| درصد تغییرات | ۱۲/۱۷ | ۱۵/۶۴ | ۱۸/۹۴ | ۱۹/۴۸ | ۱۹/۷۶ |

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۱۲-۹۱




**شکل ۷** تغییرات ضریب هدایت حرارت نانو CuO با غلظت مختلف نسبت به آب دی‌یونیزه در دمای °C ۱۰۰

کیم و همکاران [۴۵] دریافتند درفرآیند جوشش برخی از نانوذرات روی سطح گرم‌کن رسوب کرده و لایه رسوب، ترشوندگی را از طریق تغییر کاهش زاویه تماس استاتیکی روی سطح گرم‌کن افزایش می‌دهد. بنابراین با افزایش ترشوندگی سطح احتمال پرشدن حفره‌ها با نانوسیال افزایش، چشمه‌های فعال کاهش و BHTC نیز کاهش می‌یابد. نتیجه به‌دست آمده با نتیجه بسیاری از محققین، که BHTC با افزایش غلظت نانوذرات در شارهای حرارتی بالا کاهش پیدا کرده است، هم‌خوانی دارد [۴۹-۴۶]. علت افزایش ترشوندگی و پر شدن حفرات به دو دلیل اصلی است: اول اینکه در فرآیند جوشش هنگام جداشدن حباب از روی سطح گرم‌کن موجب می‌شود که مقداری از نانوذرات جای حباب را بگیرند. دوم اینکه از طرفی نیروهای واندروالس (نیروی جاذبه و عامل اصلی در تجمعات ذرات) با افزایش جرم و حجم مولکول، افزایش یافته، که باعث افزایش کلوخه شدن بیشتر نانوذرات می‌شود. طبق نتایج، نکته‌ای که درمورد افزودن نانوذرات به سیال وجود دارد اینست که نمی‌توان به هر اندازه مقدار نانوذرات را به‌علت ناپایداری در سیال افزایش داد، یعنی مقداری بهینه باید تعیین گردد. جدول ۶ اثرات افزایش درصد وزنی غلظت نانوذرات بر تغییرات دمایی نسبت به آب دی‌یونیزه را نشان می‌دهد. باز هم نتایج نشان می‌دهند که افزایش نانوذرات باعث می‌شود تا فرآیند جوشش در دمای فوق اشباع کمتر سطح انجام گیرد. اما اضافه کردن نانوذرات بیش از مقدار بهینه آن باعث می‌شود تا روند اختلاف دما کمتر شود. طبق جدول ۶ روند متوسط اختلاف دما از غلظت ۰/۰۲۵ تا wt.٪ ۰/۰۷۵، حدود ۲/۵٪ افزایش یافته و پس از آن به کمتر از۰/۵٪ رسید. هر چند افزایش غلظت،کاهش تغییرات BHTC را به‌دنبال داشته اما در افزایش شارحرارتی بحرانی نقشی مؤثر ایفا کرده به‌طوری‌که این نتیجه با نتایج محققین [۵۱ و ۵۰] هم‌خوانی دارد. تا اینجا مشخص شد که استفاده از نانوذرات CuO به سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی و به دنبال آن باعث افزایش BHTC شده است. اما مشکل اصلی نانوذرات در شارهای حرارتی بالا بود که به‌شدت به‌علت ناپایداری و رسوب کردن نانوذرات باعث کاهش BHTC می‌شود. در ادامه به بررسی روش‌های متداول برای پایداری نانوذرات یعنی تغییر pH و تاباندن امواج فراصوت به نانوسیال برای پایدار نگه‌داشتن نانوذرات در سه غلظت ۰/۰۷۵، ۰/۱ و wt.٪ ۰/۱۲۵با بالاترین BHTC در طول آزمایش‌ها، پرداخته می‌شود.

**جدول ۶** متوسط درصد تغییرات فوق اشباع سطح گرم‌کن نانو CuO با غلظت مختلف نسبت به آب دی‌یونیزه.

| درصد وزنی نانوذره | ۰/۰۲۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۷۵ | ۰/۱ | ۰/۱۲۵ |
|---|---|---|---|---|---|
| درصد تغییرات | -۱۰/۸۳ | -۱۳/۴۸ | -۱۵/۹۰ | -۱۶/۲۴ | -۱۶/۴۰ |

تغییرات اعمال شده در هر دو روش در سه سطح (مقدار)، برای پیدا کردن سطح بهینه آزمایش گردید. انتخاب حدود برای شروع این سطوح براساس مقادیری بوده که در مقالات پیشین ذکر شده بود. نکته مهم که باید ذکر شود این است که این دو روش پایداری نانوسیالات، روش‌های معمولی هستند که همواره برای همه شرایط فرآیندی (جوشش و غیر جوشش) انجام گرفته‌اند و حال باید بررسی شود که، نتایج و اثرات این روش‌ها در فرآیند جوشش استخری تا چه حد مؤثر می‌باشند.

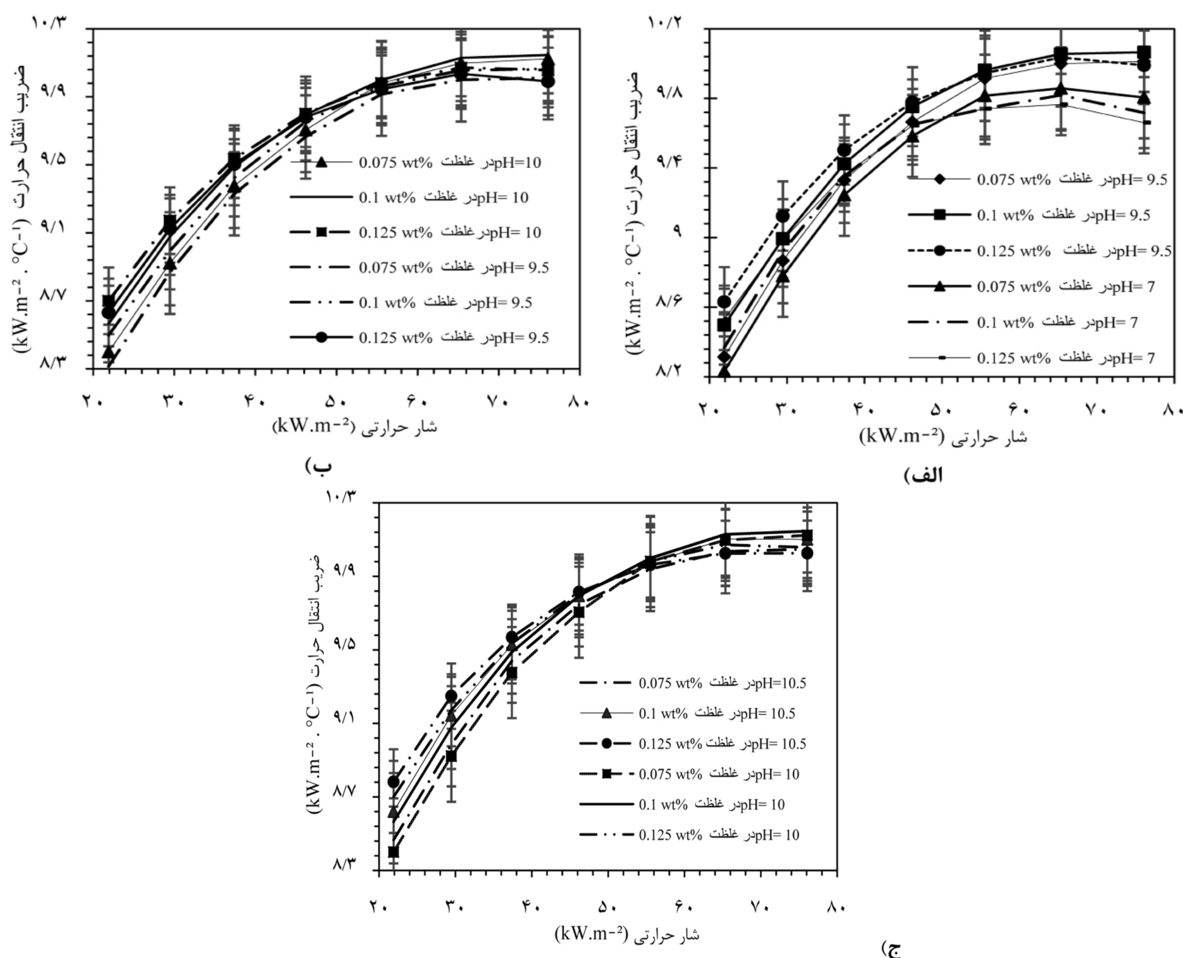
**پایدارکننده‌های نانوذرات**

**تأثیر تغییر pH بر BHTC**

اولین مرحله برای پایدار کردن نانوذرات، تغییر pH نانوسیال و تاثیر آن بر ضریب انتقال حرارت است. شکل ۸ (الف-ج)، تغییرات pH در سه سطح ۹/۵، ۱۰ و ۱۰/۵ برای پایداری نانوسیال CuO و در سه غلظت ۰/۰۷۵، ۰/۱ و ۰/۱۲۵ wt.٪را نشان می‌دهد. اولین مرحله برای پایدارکردن نانوذرات، تغییر pH نانوسیال و تأثیر آن بر ضریب انتقال حرارت است. لازم به ذکر است که pH اولیه آب دی یونیزه مورد مطالعه برابر ۷ اندازه‌گیری شد. همچنین محدوده انتخابی pH برای رسیدن به نتیجه بهتر و سریع‌تر از نتایج تحقیقات قبلی انتخاب شده است [۳۰ و ۲۹]. با افزایش pH نانوسیال از ۷ به ۹/۵ در شکل ۸ (الف) نتایج نشان می‌دهند که تغییر pH تأثیر مثبت برروی افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گذارد. اما تأثیر pH در تمام طول فرآیند مطلوب نبوده، به‌طوری که تا شار حرارتی $55\ kW.m^{-2}$ روند تغییرات ضریب انتقال حرارت صعودی بوده و بعد از آن این روند کاهش پیدا کرده است یعنی افزایش pH به ۹/۵ نتوانسته در تمام طول آزمایش‌ها، پایداری نانوذرات را حفظ کند و روند افزایشی ضریب انتقال حرارت را ادامه دهد چرا که با رسوب نانوذرات، ضریب هدایت حرارتی و در نتیجه ضریب انتقال حرارت کاهش پیدا می‌کند. در ادامه، pH از ۹/۵ به ۱۰ افزایش داده شد. نتایج در شکل ۸ (ب و ج) نشان می‌دهد که افزایش pH از ۹/۵ به ۱۰، ضریب انتقال حرارت در غلظت wt.٪ ۰/۱ به بیشترین مقدار رسیده است. اما ضریب انتقال حرارت با افزایش pH از ۱۰به ۱۰/۵ کاهش پیدا می‌کند. هر چند که pH= ۱۰/۵ طبق جدول ۷ بیشترین افزایش ضریب انتقال حرارت را داشته اما، بیشتر این افزایش‌ها در شارهای حرارتی پایین بوده و هر چه شار حرارتی افزایش پیدا کند، روند آن کاهشی می‌شود. بالاترین ضریب انتقال حرارت به‌دست آمده مقدار $10/15\ kW.m^{-2}$ در pH= ۱۰ و در غلظت wt.٪ ۰/۱ است که نشان می‌دهد بهترین میزان pH برای نانوسیال CuO مقدار ۱۰ می‌باشدکه این نتیجه با نتایج دیگر محققین برای نانوسیال CuO همخوانی دارد [۲۰ و ۱۹].

در مورد تغییرات ایجاد شده توسط pH بر ضریب انتقال حرارت دو نکته وجود دارد: اول میزان پایداری نانوذرات و دور شدن از نقطه ایزوالکتریک و دوم تغییر در قطر جدایش حباب است. در مورد نقطه ایزوالکتریک بیان شد که با تغییر pH، نانوسیال از نقطه ایزوالکتریک دور می‌شود و با افزایش نیروهای دافعه بین ذرات خود پایدارتر می‌شود. قطر جدایش حباب نیز پارامتری مهم و شناخته شده در تعیین شدت انتقال حرارت در طی فرآیند جوشش است [۵۱-۵۴]. هر چه قطر جدایش حباب افزایش پیدا کند، اختلاط و آشفتگی در محلول در حین فرآیند بیشتر می‌شود. اما با افزایش pH محلول، قطر جدایش حباب‌ها کوچک‌تر شده، که علت آن نیز کاهش کشش سطحی به‌واسطه افزایش pH است.

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۱۲-۹۱

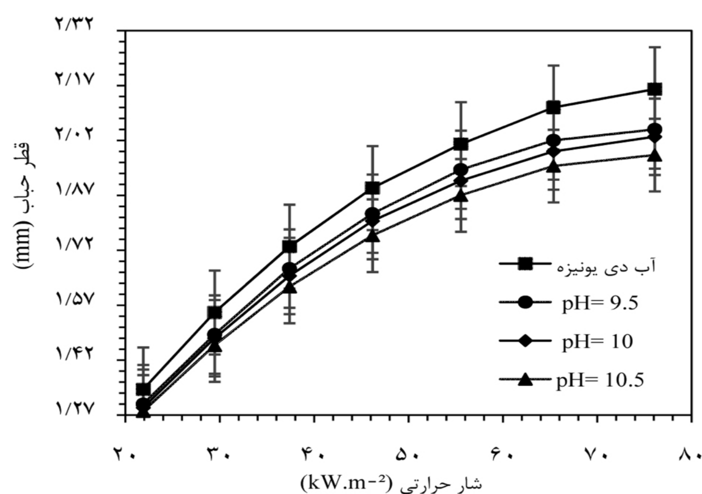



**شکل ۸** تاثیر pH بر ضریب انتقال حرارت در جوشش نانوسیال: الف) ۹/۵، ب) ۹/۵ و ۱۰ و ج) ۱۰ و ۱۰/۵

**جدول ۷** متوسط درصد تغییرات BHTC در سه سطح pH نسبت به آب دی یونیزه.

| درصد وزنی نانوذره | ۰/۰۷۵ | ۰/۱ | ۰/۱۲۵ |
|---|---|---|---|
| pH= ۹/۵ | ۲۰/۳۴ | ۲۱/۵۷ | ۲۲/۱۱ |
| pH= ۱۰ | ۲۱/۲۵ | ۲۲/۳۹ | ۲۲/۶۸ |
| pH= ۱۰/۵ | ۲۱/۴۰ | ۲۲/۵۴ | ۲۲/۶۱ |

کاهش کشش سطحی باعث می‌شود تا حباب‌ها در هنگام رشد برروی سطح گرم‌کن فرصت کمتری برای رشد داشته باشند و در نتیجه قطر جدایش آن‌ها کاهش یابد. ولی افزایش pH از ۹/۵ به بالا، موجب کاهش بیش از حد کشش سطحی شده که منجر به کاهش مقدار زیاد قطر جدایش حباب و در نتیجه کاهش ضریب انتقال حرارت را در پی دارد. در مورد کاهش قطر حباب، تأثیر رسوب نانوذرات CuO بر سطح گرم‌کن نیز باید در نظر گرفته شود. زیرا تشکیل رسوب باعث کاهش قطر حباب می‌شود [۵۵]. نانوذرات با رسوب برروی سطح گرم‌کن باعث به‌وجود آمدن چشمه‌های جدید مولد حباب اما کوچک‌تر شده اما با گذر زمان ذرات دیگری با وارد شدن به این چشمه‌های فعال آن‌ها را به چشمه‌های کوچک‌تر تبدیل می‌کنند. شکل‌های ۹ و ۱۰ (الف-د) تغییرات قطر جدایش حباب را با تغییر pH نشان می‌دهند.




**شکل ۹** تأثیر pH بر قطر جدایش حباب نانوسیال


pH=۷ (الف)


pH= ۹/۵ (ب)


pH=۱۰ (ج)


pH= ۱۰/۵ ( د)

**شکل ۱۰** تصاویر واقعی تاثیر pH برقطرجدایش حباب

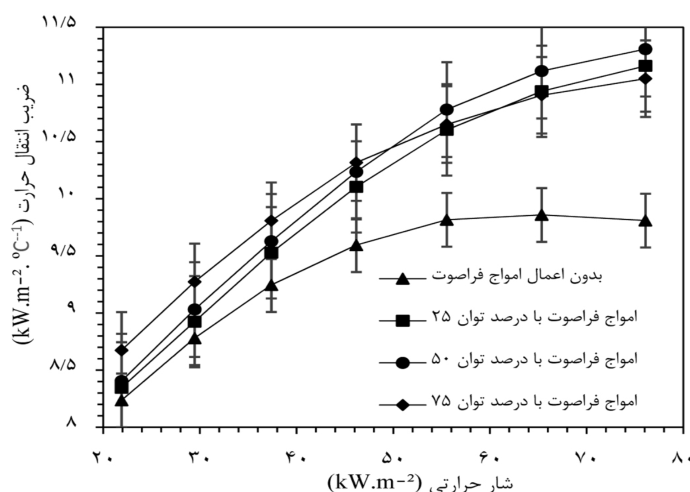
**تأثیراعمال امواج فراصوت بر BHTC**

در این قسمت به بررسی اثر تابش امواج فراصوت بر ضریب انتقال حرارت پرداخته شده است. دستگاه انتخابی از نوع روش مستقیم، یعنی قرار دادن پراب دستگاه به‌طور مستقیم در محلول است. اما استفاده از پراب شامل در نظر گرفتن چندین پارامتر هم‌زمان، از قبیل میزان توان دستگاه، سیکل، زمان تابش و میزان فاصله سنسور پراب از سطح گرم‌کن است. دستگاه دارای شدت فرکانس ۲۴ kHz بوده که در سه درصد توان ۲۵، ۵۰ و ۷۵ استفاده شده است.

فاصله سنسور پراب از سطح گرم‌کن، با آزمایش‌های مختلف ۴ cm که بیشترین تأثیر را بر افزایش ضریب انتقال حرارات داشته است، انتخاب شد. همان‌طور که در شکل ۱۱ نیز مشاهده می‌شود، اعمال امواج فراصوت باعث افزایش ضریب انتقال حرارت شده است زیرا این امواج با تغییر دما و فشار در محلول باعث ایجاد پدیده کاویتاسیون (حباب‌زایی) و افزایش قطر حباب در محلول می‌شوند. همان‌طور که در بالا هم اشاره شد، قطر جدایش حباب در نانوسیال‌ها نسبت به سیال پایه کوچک‌تر است و هر چه حباب بزرگ‌تر تولید شود در نتیجه اغتشاشات بیشتر شده و ضریب انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد [۵۶]. امواج فراصوت فرکانس پایین ۲۴ kHzاستفاده شده در این تحقیق توانایی تشکیل حباب‌های بزرگ‌تر را دارا می‌باشند. یعنی امواج فراصوت اثری را که نانوذرات بر کاهش قطر جدایش حباب در محلول دارند را جبران می‌کند. در جدول ۸ میزان تغییرات اعمال فراصوت در توان‌های مختلف نسبت به‌حالت بدون اعمال فراصوت نشان داده شده است.

**بهینه کردن دوره تابش امواج فراصوت بر BHTC**

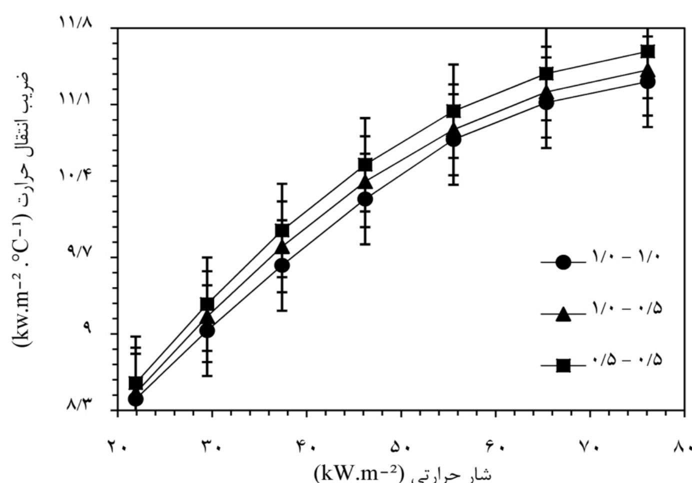
در بخش قبلی مشخص شد که دوره تابش در توان ۵۰٪ ، بهترین عملکرد را در افزایش ضریب انتقال حرارت دارد. حال به بررسی پارامتر دوم در تنظیم امواج فراصوت یعنی دوره یا سیکل تابش که شامل دو زمان بوده پرداخته می شود. این دو زمان شامل زمان تابش و زمان استراحت است. در این تحقیق با توجه به تجربیات آزمایشگاهی و شرایط آزمایشگاهی از سه دوره۱–۱ و ۰/۵–۱ و ۰/۵–۰/۵ استفاده شده که عدد سمت راست زمان استراحت و عدد سمت چپ زمان تابش امواج و به‌صورت ثانیه هستند. شکل ۱۲ و جدول ۹ نشان می‌دهد که با تنظیم دوره تابش به‌صورت ۰/۵ – ۰/۵ بهترین شرایط پایداری محقق می‌شود زیرا این زمان با تابش بیشتر و اما کوتاه موجب حذف احتمالی نانوذرات از سطح و همچنین تولید حباب بیشتر در محلول شده و در نتیجه منجر به بیشترین میزان ضریب انتقال حرارت شده است. در جوشش هسته‌ای به‌سبب تولید حباب‌ها در حجم بالا لازم است که حباب‌ها سریعاً از سطح انتقال حرارت حذف و جای خود را به حباب‌های تازه دهند.




**شکل ۱۱** تغییرات BHTC نانو سیال با درصد توان‌های مختلف فراصوت در غلظت۰/۱۲۵٪

**جدول ۸** تغییرات عددی متوسط BHTC نانوسیال در غلظت ۰/۱۲۵٪ با درصد توان‌های مختلف تابش فراصوت نسبت به بدون تابش.

| درصد توان امواج فراصوت | ۲۵ | ۵۰ | ۷۵ |
|---|---|---|---|
| h (kW.m-2.°C-1) | ۶/۳۲ | ۳۷/۴۸ | ۳۴/۸ |




**شکل ۱۲** تغییرات متوسط BHTC نانوسیال با غلظت ۰/۱۲۵٪ بادامنه تابش مختلف

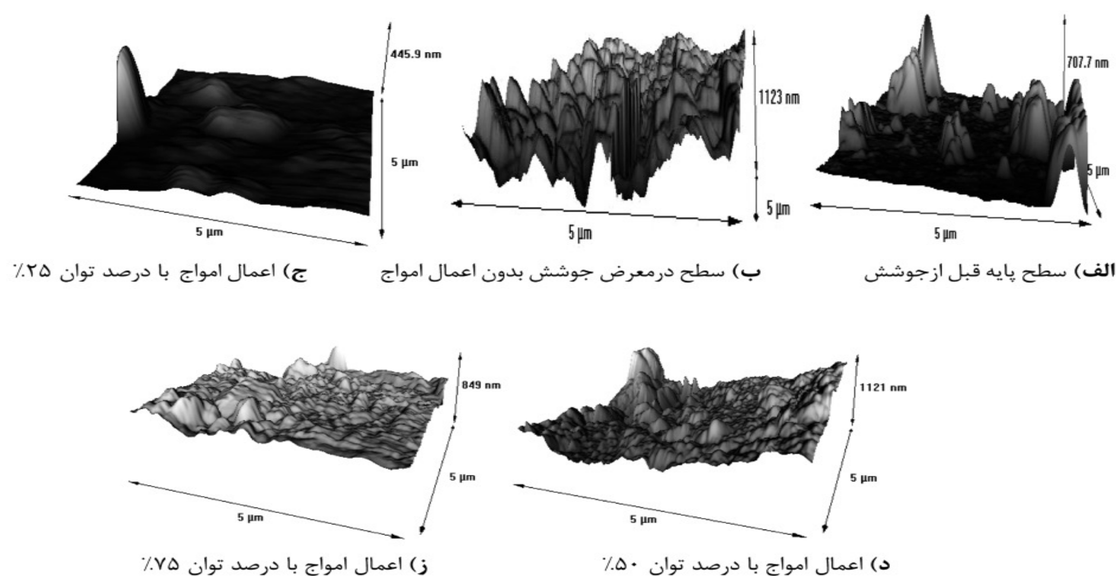
**جدول ۹**تغییرات عددی متوسط BHTC نانو سیال با غلظت ۰/۱۲۵٪ باسیکل تابش مختلف نسبت به ۱-۱

| زمان (S) | ۱–۰/۵ | ۰/۵–۰/۵ |
|---|---|---|
| h (kW.m⁻².°C⁻¹) | ۱/۱۴ | ۲/۵۸ |

بنابراین در این مطالعه دوره تابش به‌صورت ۰/۵-۰/۵با تابش مداوم و در زمان کم‌تر نسبت به دوره۱-۱ ، حباب‌ها سریع‌تر حذف و جای خود را به حباب‌های تازه می‌دهند.

جهت بررسی افزایش رسوب که به‌صورت افزایش زبری بر سطح انتقال حرارت ظاهر می‌شوند و همچنین تاثیر امواج فراصوت بر کاهش آن‌ها، از تصاویر سه بعدی میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)[1] استفاده شد. زبری‌ها به‌صورت پستی و بلندی در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با اعمال امواج فراصوت، زبری سطح انتقال حرارت کاهش یافته است. این روند کاهشی از توان ۲۵٪ تا ۵۰٪ می‌باشد. اما با اعمال توان بیشتر به ۷۵٪ بار دیگر افزایش زبری را به‌همراه داشته است این مسئله می تواند به‌علت برخورد بیشتر ذرات در اثر شتاب بیش از حد با انرژی بالا باشد. از طرفی شار حرارت بحرانی با استفاده از ارتعاشات امواج فراصوت و همچنین مقیاس pH، افزایش می‌یابد. امواج، حذف حباب‌های از سطح گرم را تسهیل می‌کنند [۵۷]. طبق شکل ۱۴ استفاده از امواج فراصوت باعث کاهش زیادی در فوق اشباع سطح انتقال حرارت شده و با حرکت منحنی‌ها به‌سمت چپ، نشان می‌دهد شار حرارت بحرانی افزایش یافته است. تعدادی از محققین دیگر همچون داگلاس [۵۸]، ایدا و تسوتسی [۵۹] تأیید کردند که شارحرارت بحرانی با استفاده از ارتعاشات فراصوت افزایش می‌یابد. همچنین، تغییرات pH در افزایش شار بحرانی مؤثر بوده که در شکل به‌وضوح دیده می‌شود. در بخش پایانی کار و در شکل ۱۵ به مقایسه عملکرد دو روش اعمال شده در این پژوهش یعنی افزایش پایداری نانوذرات و تأثیر آن بر افزایش ضریب انتقال حرارت در جوشش استخری پرداخته شده است. البته در این مقایسه به‌علت تعداد زیاد آزمایش‌ها، مقایسه بین بهترین حالت ممکن به‌دست آمده در هر روش صورت گرفته است. برای تغییر pH، pH= ۱۰ و برای تابش امواج فراصوت، توان۵۰٪ استفاده شده است. همان‌طور که مشخص است و در قسمت‌های قبلی هم توضیح داده شد، امواج فراصوت به‌طور متوسط با افزایش ضریب انتقال حرارتی برابر با ۳۷/۴۸٪ در غلظت ۰/۱۲۵ Wt.٪ به بهترین عملکرد دست پیدا کرده است.

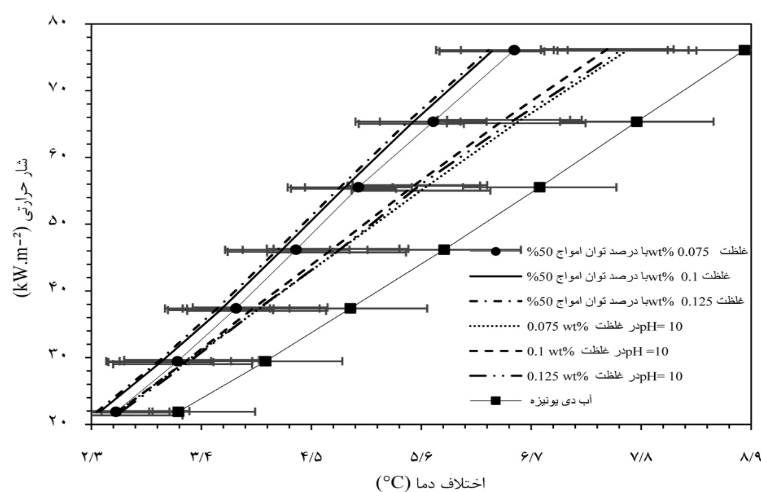
1. Atomic Force Microscopy



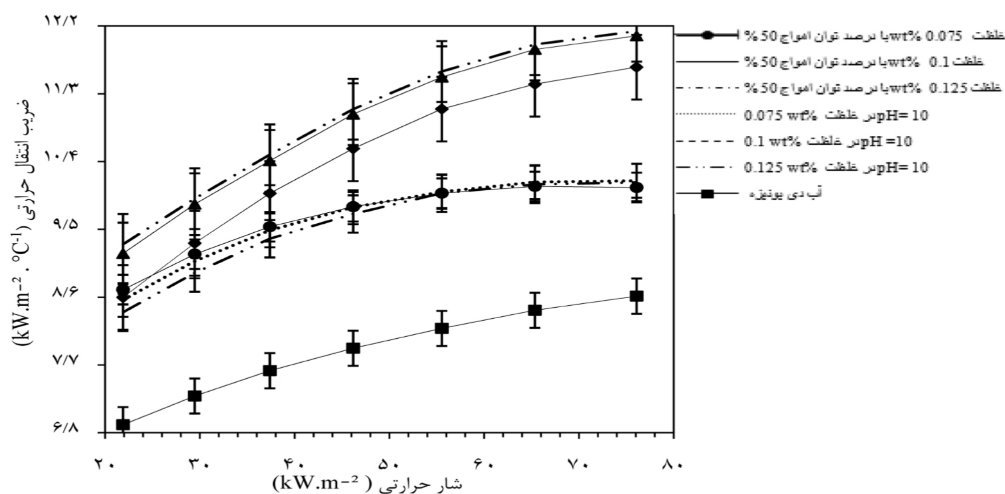

**الف)** سطح پایه قبل ازجوشش **ب)** سطح درمعرض جوشش بدون اعمال امواج **ج)** اعمال امواج با درصد توان ۲۵٪

**د)** اعمال امواج با درصد توان ۵۰٪ **ز)** اعمال امواج با درصد توان ۷۵٪

**شکل ۱۳** تصاویر AFM از تاثیر امواج فراصوت بر کاهش رسوبات نانوذرات




**شکل ۱۴** مقایسه دو روش امواج فراصوت و pH در کاهش درصد فوق اشباع سطح گرم‌کن نسبت به آب دی‌یونیزه




**شکل ۱۵** مقایسه دو روش اعمال شده امواج فراصوت و pH در افزایش BHTC نسبت به آب دی‌یونیزه

از مهم‌تریـن دلایـل ایـن افزایـش می‌تـوان بـه ایجـاد تلاطـم، افزایش قطـر جدایـش حبـاب و مهم‌تـر اینکـه ایـن افزایش بـدون اضافـه کـردن هیـچ مـاده ی دیگـری بـه محلـول حاصـل شـده اسـت. چـرا کـه در تغییـر pH محلـول به‌واسـطه اضافـه کـردن یـک مـاده دیگـر بـه محلـول اصلـی موجـب می‌شـود کـه در معـادلات مربوطـه جهـت محاسـبه دینامیـک حبـاب، پارامترهـای جدیـدی وارد حـل معـادلات شـوند.

## نتیجه‌گیری

انتقـال حـرارت جوشـش به‌عنـوان یـک روش تبـادل حـرارت کارآمـد، به‌طـور گسـترده‌ای در زمینه‌هـای متعـددی ماننـد خنـک کننـده دسـتگاه‌های الکترونیکـی، چرخـه قـدرت، ذخیـره سـازی و انتقـال مایعـات برودتـی در محفظـه بـه‌کار گرفتـه می‌شـود.در ایـن مطالعـه آزمایشـگاهی بـه بررسـی اثـرات افـزودن نانـوذرات CuO بـه سـیال بـا پایـه آب دی یونیـزه، جهـت افزایـش ضریـب انتقـال حـرارت پرداختـه شـد. سیسـتم مـورد آزمایـش از یـک ظـرف شیشـه‌ای بـا مقاومـت حرارتـی بـالا کـه دارای یـک گرم‌کـن از جنـس مـس بـه شـکل اسـتوانه و بـا زبـری ثابـت µm ۰/۸۴ انجـام گرفـت. نتایـج نشـان داد کـه افـزودن نانـوذرات باعـث افزایـش ضریـب انتقـال حـرارت جوشـش شـد. امـا ایـن نانـوذرات به‌علـت عـدم پایـداری طولانـی در سوسپانسـیون، موجـب رسـوب بـرروی سـطح گرم‌کـن شـده و بـه مـرور زمـان باعـث کاهـش ضریـب انتقـال حـرارت می‌شـود.

از ایـن جهـت در ایـن پژوهـش از دو روش متـداول در پایـداری نانوسـیال یعنـی تغییـر pH ( ۹/۵، ۱۰ و ۱۰/۵) و تابـش امـواج فراصـوت (بـا درصـد توان‌هـای ۲۵، ۵۰ و ۷۵) اسـتفاده شـده اسـت. نتایـج کار در زیـر خلاصـه شـده اسـت:

۱- اسـتفاده از هـر دو روش موجـب افزایـش ضریـب انتقـال حـرارت به‌واسـطه افزایـش پایـداری نانـوذرات در سوسپانسـیون شـد.

۲- افزایـش ضریـب انتقـال حـرارت جوشـش در غلظـت ۰/۱۲۵ Wt.٪بـرای امـواج فراصـوت بـا متوسـط ۳۷/۴۸٪ در دامنـه ۵۰٪ از تـوان و بـرای pH= ۱۰ برابـر ۲۲/۶۸٪ تعییـن گردیـد.

۳- تغییـر pH به‌دلیـل کاهـش کشـش سـطحی، باعـث کاهـش قطـر جدایـش حبـاب شـده و کاهـش قطـر موجـب کـم شـدن اختـلاط در محلـول در حـال جوشـش شـد. از طرفـی تغییـر pH فقـط در شـارهای حرارتـی پاییـن مناسـب بـوده و منجـر بـه افزایـش ضریـب انتقـال حـرارت گردیـد.

۴- امـواج فراصـوت به‌دلیـل اینکـه مـاده جدیـدی بـه محلـول درحـال جوشـش اضافـه نشـد و از طرفـی به‌دلیـل افزایـش قطـر جدایـش حبـاب و همچنیـن کاهـش ویسـکوزیته منجـر بـه افزایـش ضریـب انتقـال حـرارت در تمامـی شـارهای حرارتـی گردیـد. همچنیـن ایـن امـواج تاثیر بسـیار زیـادی بـر افزایـش شـار حرارتی بحرانـی داشـت.

## علائم و نشانه‌ها

*A*: سطح مقطع ($m^2$)

$C_p$: ظرفیت حرارتی ($J\ kg^{-1}\ C^{-1}$)

*D*: قطر حباب (mm)

$F_{(pr)}$: پارامتر رابطه گارنفلو

*g*: گرانش

$H_{fg}$: گرمای نهان تبخیر ($J\ kg^{-1}$)

*H*: ضریب انتقال حرارت جوشش

*I*: جریان (A)

*I**: پارامتر رابطه کوتاتلادزه

*K*: ضریب هدایت حرارتی ($W\ m^{-1}\ C^{-1}$)

*L*: طول (m)

*M**: پارامتر رابطه کوتاتلادزه

$n(p_r)$: پارامتر رابطه گارنفلو

*P*: فشار (Pa)

*Pr*: عدد پرانتل

*q*: شار حرارتی (W)

$R_p$: متوسط زبری سطح انتقال حرارت

T: دما (°C)

*V*: ولتاژ (V)

**نمادهای یونانی**

ضریب نفوذ ($m^2\ s^{-1}$)

*ρ*: چگالی ($kg\ m^{-3}$)

*δ*: عمق نفوذ (mm)

*μ*: ویسکوزیته ($kg\ m^{-1}\ s^{-1}$)

*σ*: کشش سطحی ($N\ m^{-1}$)

*π*: عدد پی

*φ*: اختلاف بین فاز، ولتاژ و جریان

Δ: اختلاف

**زیر نویس‌ها**

*0*: پایه

*b*: حباب

*d*: قطر

*c*: بحرانی

*l*: مایع

*s*: سطح

*sat*: اشباع

*th*: گرما

*v*: بخار

*W*: وات

**مراجع**

[1]. Sunil L, Kumarappa S, Hegde R (2016) Experimental studies on pool boiling heat transfer using alumina and graphene oxied nanofluid, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN, 03, 01: 2395-0056

[2]. Chung J, Chen T, Maroo S (2011) A review of recent progress on nano/micro scale nucleate boiling fundamentals, Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 2: 2.

[3]. Liu W, Yang Z, Zhang B, Lv P (2017) Experimental study on the effects of mechanical vibration on the heat transfer characteristics of tubular laminar flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 115: 169-79.

[4]. Léal L, Miscevic M, Lavieille P, Amokrane M, Pigache F, Topin F, Nogarède B, Tadrist L (2013) An overview of heat transfer enhancement methods and new perspectives: Focus on active methods using electroactive materials, International Journal of Heat and Mass Transfer, 61: 505-24.

[5]. Improvement of heat transfer by means of ultrasound: Application to a double-tube heat exchanger (2012) Ultrasonics Sonochemistry, 19: 1194-1200.

[6]. Azmi W, Sharif M, Yusof T, Mamat R, Redhwan (2017) Potential of nanorefrigerant and nanolubricant on energy saving in refrigeration system–A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 69: 415-28.

[7]. Sheikholeslami M, Gorji-Bandpy M, Ganji D D (2015) Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49: 444-69.

[8]. Leong K, Ho J, Wong K (2017) A critical review of pool and flow boiling heat transfer of dielectric fluids on enhanced surfaces, Applied Thermal Engineering, 112: 999-1019.

[9]. Yang L, Du K (2017) A comprehensive review on heat transfer characteristics of $TiO_2$ nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, 108: 11-31.

[10]. Amani M, Amani P, Kasaeian A, Mahian O, Wongwises S (2017) Thermal conductivity measurement of spinel-type ferrite MnFe2O4 nanofluids in the presence of a uniform magnetic field, Journal of Molecular Liquids, 230: 121-8.

[11]. Choi S U, Eastman J A (1995) Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Argonne National Lab., (ANL), Argonne, IL (United States).

[12]. Timofeeva E V, Gavrilov A N, McCloskey J M, Tolmachev Y V, Sprunt S, Lopatina L M, Selinger J V (2007) Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory, Physical Review E, 76: 061203.

[13]. Hong K, Hong T K, Yang H S (2006) Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles, Applied Physics Letters, 88: 031901.

[14]. Vafaei S, Borca Tasciuc T (2014) Role of nanoparticles on nanofluid boiling phenomenon: Nanoparticle deposition, Chemical Engineering Research and Design, 92: 842-56.

[15]. Das P K, Mallik A K, Ganguly R, Santra A K (2016) Synthesis and characterization of $TiO_2$–water nanofluids with different surfactants, International Communications in Heat and Mass Transfer, 75: 341-8.

[16]. Xuan Y, Li Q (2000) Heat transfer enhancement of nanofluids, International Journal of heat and fluid flow, 21: 58-64.

[17]. Wamkam C T, Opoku M K, Hong H, Smith P (2011) , Effects of pH on heat transfer nanofluids containing $ZrO_2$ and $TiO_2$ nanoparticles, Journal of Applied Physics, 109: 024305.

[18]. Goudarzi K, Nejati F, Shojaeizadeh E, Yousef Abad S A (2015) Experimental study on the effect of pH variation of nanofluids on the thermal efficiency of a solar collector with helical tube, Experimental Thermal and Fluid Science, 60: 20-7.
[19]. Sarafraz M, Hormozi F (2015) Pool boiling heat transfer to dilute copper oxide aqueous nanofluids, International Journal of Thermal Sciences, 90: 224-37.
[20]. Peyghambarzadeh S, Hashemabadi S, Naraki M, Vermahmoudi Y (2013) Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator, Applied Thermal Engineering, 52: 8-16.
[21]. Habibzadeh S, Kazemi-Beydokhti A, Khodadadi A A, Mortazavi Y, Omanovic S, Shariat Niassar M (2010) Stability and thermal conductivity of nanofluids of tin dioxide synthesized via microwave-induced combustion route, Chemical Engineering Journal, 156: 471-8.
[22]. Mahbubul I, Shahrul I, Khaleduzzaman S, Saidur R, Amalina M, Turgut A (2015) Experimental investigation on effect of ultrasonication duration on colloidal dispersion and thermophysical properties of alumina–water nanofluid, International Journal of Heat and Mass Transfer, 88: 73-81.
[23]. Ghotbinasab S, Khooshehchin M, Mohammadidoust A, Rafiee M, Salimi F, Fathi S (2021) Comparing the heat transfer coefficient of copper sulfate and isopropanol solutions in the pool boiling process: Bubble dynamic and ultrasonic intensification, Chemical Engineering Science, 116589.
[24]. Yang L, Du K, Zhang X S, Cheng B (2011) Preparation and stability of $Al_2O_3$ nano-particle suspension of ammonia–water solution. Applied Thermal Engineering, 31: 3643-7.
[25]. Kim H, Kim Y, BH kang (2004) Enhancement of natural convection and pool boiling heat transfer via ultrasonic vibraton, Journal of Heat and Mass Transfer, 47:2831-40.
[26]. Khooshehchin M, Mohammadidous A, Ghotbinasab S (2020) An optimization study on heat transfer of pool boiling exposed ultrasonic waves and particles addition, International Communications in Heat and Mass Transfer, 114: 104558.
[27]. Taurozzi J S, Hackley V A, Wiesner M (2012) Preparation of nanoparticle dispersions from powdered material using ultrasonic disruption, NIST Special Publication, 1200: 1200-2.
[28]. Rohsenow W M (1951) A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids,Cambridge, Mass.: MIT Division of Industrial Cooporation, 5, 3-4.
[29]. Kutateladze S S (1995) Heat transfer in condensation and boiling, AEC-tr-3770.
[30]. Stephan K, Abdelsalam M (1980) Heat-transfer correlations for natural convection boiling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 23: 73-87.
[31]. Gorenflo D (1993) Pool Boiling, VDI Heat Atlas, VDI-Verlag, Dusseldorf, Germany.
[32]. Fazel S A, Roumana S (2010) Pool boiling heat transfer to pure liquids, In: WSEAS Conference, USA.
[33]. Fazel S A A (2017) A genetic algorithm-based optimization model for pool boiling heat transfer on horizontal rod heaters at isolated bubble regime, Heat and Mass Transfer, 53: 2731-2744.
[34]. Lu L, Liu Z H, Xiao H S (2011) Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluids for high-temperature evacuated tubular solar collectors: Part 1: Indoor experiment, Solar Energy, 85, 2: 379-387.
[35]. Wong K V, Castillo M J (2010) Heat transfer mechanisms and clustering in nanofluids, Advances in Mechanical Engineering, 2: 795478.
[36]. Xu G, Fu J, Dong B, Quan Y, Gu G (2019) A novel method to measure thermal conductivity of nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, 130: 978-988.
[37]. Asadi A, Asadi M, Rezaniakolaei A, Aistrup L, Rosendahl L A, frand M, Wongwises S (2018) Heat transfer efficiency of $Al_2O_3$-MWCNT/thermal oil hybrid nanofluid as a cooling fluid in thermal and energy management applications: An experimental and theoretical investigation, International Journal of Heat and Mass Transfer, 117: 474-486.
[38]. Esfahani N N, Toghraie D, Afrand M (2018) A new correlation for predicting the thermal conductivity of ZnO–Ag (50%–50%)/water hybrid nanofluid: an experimental study, Powder Technology, 323: 367-373.
[39]. Hamid K A, Azmi W H, Nabil M F, Mamat R (2018) Experimental investigation of nanoparticle mixture ratios on $TiO_2$–$SiO_2$ nanofluids heat transfer performance under turbulent flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 118: 617-627.
[40]. Yu W, Xie H, Chen L, Li Y (2010) Investigation on the thermal transport properties of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, Powder Technology, 197, 3: 218-221.
[41]. Kwark S M, Kumar R, Moreno G, Yoo J, You S M (2010) Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 5-6: 972-981.
[42]. Wong K V, Castillo M J (2010) Heat transfer mechanisms and clustering in nanofluids, Advances in Mechanical Engineering, 2: 1-9.
[43]. Wang X j, Zhu D S (2009) Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in

nanofluids, Chemical Physics Letters, 470, 1-3: 107-111.
[44]. Patra N, Ghosh P, Singh R S, Nayak A (2019) Flow visualization in dilute oxide based nanofluid boiling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 135: 331-344.
[45]. Kim S J, Bang I C, Buongiorno J, Hu W (2007) Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, 19-20: 4105-4116.
[46]. Suriyawong A, Wongwises S (2010) Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of $TiO_2$–water nanofluids at very low concentrations, Experimental Thermal and Fluid Science, 34, 8: 992-999.
[47]. Cieslinski J T, Kaczmarczyk T Z (2011) Pool boiling of water-$Al_2O_3$ and water-Cu nanofluids on horizontal smooth tubes, Nanoscale Research Letters, 6, 1: 220.
[48] Umesh V, Raja B (2015) A study on nucleate boiling heat transfer characteristics of pentane and CuO-pentane nanofluid on smooth and milled surfaces, Experimental Thermal and Fluid Science, 64: 23-29.
[49]. Shahmoradi Z, Etesami N, Esfahany M N, (2013) Pool boiling characteristics of nanofluid on flat plate based on heater surface analysis, International Communications in Heat and Mass Transfer, 47: 113-120.
[50]. Shi M, Shuai M, Xuan Y (2006) Experimental study of pool boiling heat transfer for nano-particle suspensions on a plate surface, in International Heat Transfer Conference 13. Begel House Library, 7.
[51]. Chopkar M, Das S K, Manna I, Das P K (2008) Pool boiling heat transfer characteristics of $ZrO_2$–water nanofluids from a flat surface in a pool, Heat and Mass Transfer, 44, 8: 999-1004.
[52]. Narayan G P, Kanjirakat A, Sateesh G, Das S.K (2008) Effect of surface orientation on pool boiling heat transfer of nanoparticle suspensions, International Journal of Multiphase Flow, 34, 2: 145-160.
[53]. Pioro I, Rohsenow W, Doerffer S (2004) Nucleate pool-boiling heat transfer. I: review of parametric effects of boiling surface, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47: 5033-44.
[54]. Gerardi C, Buongiorno J, Hu L w, McKrell T (2010) Study of bubble growth in water pool boiling through synchronized, infrared thermometry and high-speed video, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53: 4185-92.
[55]. Cao Z, Wu Z, Pham A D, Yang Y, Abbood S, Falkman P, Ruzgas T, Albèr C, Sundén B (2019) Pool boiling of HFE-7200 on nanoparticle-coating surfaces: Experiments and heat transfer analysis, International Journal of Heat and Mass Transfer, 133: 548-60.
[56]. Rostamzadeh A, Jafarpur K, Rad E G (2016) Numerical investigation of pool nucleate boiling in nanofluid with lattice Boltzmann method, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 54.
[57]. Li B, Han X, Wan Z, Wang X, Tang Y (2016) Influence of ultrasound on heat transfer of copper tubes with different surface characteristics in sub-cooled boiling, Applied Thermal Engineering, 92: 93-103.
[58]. Douglas Z, Boziuk T R, Smith M K, Glezer A (2012) Acoustically enhanced boiling heat transfer, Physics of Fluids, 24: 052105.
[59]. Iida Y, Tsutsui K (1992) Effects of ultrasonic waves on natural convection, nucleate boiling, and film boiling heat transfer from a wire to a saturated liquid, Experimental Thermal and Fluid Science, 5: 108-15.

# مدل‌سازی تخلخل با استفاده هم‌زمان نشان‌گرهای لرزه‌ای و رخساره‌های الکتریکی در مخزن سروک در یکی از میادین نفتی ایران

ولی مهدی‌پور[۱]، احمدرضا ربانی*[۱] و علی کدخدائی[۲]
۱- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تبریز، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰

**چکیده**

توزیع مناسب تخلخل مفید در مدل‌سازی استاتیک مخازن هیدروکربونی اهمیت به‌سزایی در محاسبات حجم سنجی، نحوه توزیع کیفیت مخزنی، مشخص کردن بخش‌های تولیدی و غیره دارد. استفاده از داده‌های ثانویه (به‌طور مثال داده‌های لرزه‌ای) و روش‌های مناسب توزیع زمین آماری می‌تواند در بهبود این فرآیند بسیار مهم باشد. در این مطالعه تخلخل مفید مربوط به مخزن ناهمگن سروک در یکی از میادین فروافتادگی دزفول به‌صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار پترل مدل گردید. بنابراین، ضمن در نظر گرفتن دانش زمین آمار در توزیع تخلخل، نقشه‌های روندی و مکعب لرزه‌ای جهت توزیع تخلخل مورد استفاده قرار گرفت. از این رو، نشان‌گر تضعیف موج لرزه‌ای، نشان‌گر پوش، نشان‌گر نرمی و نشان‌گر دامنه جذر میانگین مربعات به‌همراه نشان‌گر مقاومت صوتی از روی مکعب لرزه‌ای ساخته شد و سپس براساس آنها نقشه‌های روندی مناسب جهت توزیع تخلخل تهیه گردید. به‌منظور کنترل توزیع تخلخل در فضای سه‌بعدی مخزن، استفاده از روش‌های خوشه‌بندی و تعیین رخساره‌های الکتریکی مورد توجه قرار گرفت. در این مطالعه، رخساره‌های الکتریکی با داده‌های ورودی مشخص و استفاده از روش MRGC جهت تشخیص بخش‌های همگن مخزنی ساخته شد. براساس آنالیز رخساره‌های الکتریکی تعداد پنج رخساره تشخیص داده شد که از بین آنها دو رخساره دارای کیفیت مخزنی پایین و سه رخساره دارای کیفیت مخزنی نسبتاً خوبی بودند. توزیع سه‌بعدی تخلخل برای هر کدام از رخساره‌های الکتریکی متناظر، از طریق واریوگرافی مشروط گردید تا روند تغییرات تخلخل یا توزیع رخساره‌ها هم‌خوانی داشته باشد. همچنین استفاده از نقشه‌های روندی تغییرات مقاومت صوتی منجر به توزیع صحیح رخساره‌های الکتریکی و آن هم به نوبه خود منجر به توزیع بهتر تخلخل گردید. به‌دلیل همبستگی بالای تخلخل با داده‌های مقاومت صوتی، از این داده به‌عنوان داده ثانویه با استفاده از روش کریجینگ هم‌زمان مرتب (collocated co-kriging) جهت توزیع بهتر تخلخل استفاده گردید. براساس این مطالعه، بخش سروک پایینی کیفیت مخزنی بهتری نسبت به بخش سروک بالایی دارد که متاثر از گسترش رخساره‌های مخزنی با کیفیت مخزنی بالا است. این مطالعه نشان داد که میزان دقت توزیع سه‌بعدی تخلخل در صورت استفاده هم‌زمان و تلفیقی از داده‌های لرزه‌ای و رخساره‌های الکتریکی همراه با استفاده از روش‌های زمین آماری مناسب زیاد شده و میزان عدم قطعیت در توزیع تخلخل کاهش می‌یابد.

**کلمات کلیدی: ناهمگنی، تخلخل، رخساره الکتریکی، مقاومت صوتی، مدل سه‌بعدی**

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی rabbani@aut.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4652.3089)

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۲۸-۱۱۳

## مقدمه

تعیین و تشخیص میزان ناهمگنی و تهیه نقشه‌ها و مدل‌های ناهمگنی مخزنی در مطالعات مخزنی و پیش‌بینی خصوصیات دینامیکی مخزن نقش اساسی دارد. در این مطالعه به‌دلیل اهمیت تخلخل در مشخصه‌سازی مخزنی، محاسبات حجم سنجی و تعیین کیفیت مخزنی، استفاده از داده‌های لرزه‌ای و آنالیز رخساره‌های الکتریکی جهت توزیع تخلخل مورد بررسی قرار گرفتند. تخمین توزیع فضایی تخلخل در فضای مخزن همیشه مورد توجه محققین مختلف بوده است [۱]. شایان ذکر است، در مدل‌سازی تخلخل، در کنار استفاده از دانش زمین آمار، تعیین و تشخیص روند تغییرات آن بسیار حایز اهمیت می باشد. مدل‌سازی تخلخل با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف از قبیل پترل، متلب، آر ام اس و غیره توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از این نرم‌افزارها امکان مدل‌سازی ساختارهای پیچیده و نامنظم زمین‌شناسی به‌همراه توزیع خواص مخزنی در فضای سه‌بعدی (با استفاده از دانش زمین آمار) فراهم شده است [۲]. مطالعات صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی تخلخل مشتمل بر استفاده از روش‌های مختلف توزیع و استفاده از الگوریتم‌های مختلف زمین‌آماری است [۳- ۶] در تهیه روندهای حاکم بر تغییرات کیفیت مخزنی، داده‌های زمین‌شناسی و لرزه‌ای نقش اساسی دارد. تخلخل یکی از مهم‌ترین پارامترهای پتروفیزیکی است که در شناخت هرچه بهتر یک مخزن هیدروکربنی نقش مؤثری ایفا می‌کند. تخلخل را می‌توان با استفاده از آنالیز نگارهای پتروفیزیکی و مغزه‌ها و همچنین از طریق تلفیق داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی با نتایج آنالیزهای نگار و مغزه ارزیابی و محاسبه کرد. توزیع تخلخل تحت تأثیر ناهمگنی مخزن قرار می‌گیرد [۷]. بنابراین، استفاده از روش‌های خوشه‌بندی و تعیین رخساره‌های الکتریکی خاص برای شکستن فضای مخزن به زیرفضاهای همگن، به‌صورت گسترده در حوزه علوم زمین مورد توجه و استفاده قرار گرفته‌است. استفاده از داده‌های رخساره‌ای و لرزه‌ای در مدل‌سازی تخلخل توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [۸ و ۹]

به‌طور کلی، رخساره رسوبی عبارت از مجموعه‌ای از لایه‌های سنگ‌های رسوبی است، که تحت شرایط یکسان در محیط رسوبی ته‌نشین شده‌اند و دارای مشخصات سنگ شناسی و دیرینه شناسی مشابه می‌باشند. رخساره می‌تواند از دیدگاه زمین‌شناسی، ژئوشیمی، لرزه‌ای، دیاژنزی، پتروفیزیکی و... مطرح شود. رخساره الکتریکی[1] عبارت است از مجموعه‌ای از پاسخ‌های نگار[2] که مشخص‌کننده یک لایه[3] و یا به عبارت بهتر چینه[4] بوده و باعث تشخیص آن از لایه‌های دیگر می‌گردد. روش‌ها و الگوریتم‌های متعددی نظیر MRG[5]، AHC[6] و SOM[7] برای خوشه‌بندی وجود دارد. هر کدام از الگوریتم‌ها با استفاده از روش‌های محاسباتی مختص به خود تعداد خوشه‌ها را با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی تعیین و تفکیک می‌کنند. این روش‌ها به خواص پتروفیزیکی مربوط می‌شوند، اما فاقد ارتباط مهم مابین قوانین زمین‌شناسی و فضایی می‌باشند [۱۰]. به‌طور کلی، تعیین خوشه های مربوط به رخساره‌های الکتریکی با نظر کاربر و با استفاده از شکل نگارها یا ابر داده‌های اولیه و استفاده از الگوریتم‌های مختلف قابل حصول است [۱۱]. در مدل‌سازی استاتیک مخزنی، وجود داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی و نشان‌گرهای مناسب استخراج شده از آن به‌عنوان داده‌های ثانویه بسیار حایز اهمیت است. نشان‌گرهای لرزه‌ای توابع ریاضی مشتق شده از داده‌های لرزه‌نگاری هستند که در حوزه‌های زمان و فرکانس از داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌شوند.

1. Electrofacies
2. log
3. Bed
4. Strata
5. Multi Resolution Graph Based Clustering
6. Ascendant Hierarchical Clustering
7. Self Organizing Map

این داده‌ها شامل زمان، دامنه، فرکانس و جذب هستند. این نشان‌گرها ما را در شناخت بهتر خصوصیات یک مخزن همراهی می‌نمایند. در این مطالعه تعدادی نشان‌گر مورد استفاده قرار گرفت که به شرح زیر است:

**نشان‌گر وارون سازی لرزه‌ای**[1] یا برگردان لرزه‌ای روشی است که باعث می‌شود براساس مدل‌های لرزه‌ای اولیه و موجک‌های تخمین زده شده، مدل مقاومت صوتی نزدیک به مدل واقعی زمین را تخمین بزند. مقاومت صوتی به‌عنوان یک نشان‌گر لرزه‌ای عمل می‌کند [۱۲].

**نشان‌گر تضعیف موج لرزه‌ای**[2] یک خاصیت ذاتی برای سنگ‌ها است که باعث اتلاف انرژی موج لرزه‌ای هنگام عبور از لایه‌های زیرسطحی و در نتیجه باعث کاهش تضعیف دامنه موج لرزه‌ای می‌شود [۱۳]. میزان تضعیف موج لرزه‌ای معمولاً با اندازه‌گیری فاکتور کیفیت سنگ[3] (Q) که عبارت است از نسبت انرژی ذخیره شده به انرژی تلف شده در هر دوره تناوب، محاسبه می‌شود [۱۴].

**نشان‌گر پوش لرزه‌ای**[4] از تریس پیچیده سیگنال لرزه‌ای که برای برجسته‌سازی ویژگی‌های لرزه‌ای استفاده شده، محاسبه می‌شود. همچنین نشان‌دهنده انرژی آنی سیگنال است و از نظر بزرگی با ضریب بازتاب متناسب است.

**نشان‌گر دامنه جذر میانگین مربعات**[5] از نشان‌گرهای لرزه‌ای حجمی بعد از انبارش بر پایه دامنه است و تغییرات چینه‌شناسی را نشان می‌دهد. این نشان‌گر همانند نسخه ملایم شده نیروی بازتابی است و در مواردی نظیر آنومالی‌های دامنه در داده لرزه‌ای به‌کارگیری می‌شود.

**نشان‌گر نرمی**[6] عبارت است از تقسیم رد لرزه[7] پوش لرزه‌ای بر مجذور میانگین فرکانس است. این نشان‌گر به‌منظور تشخیص نقاط مطلوب جاهایی که نفت یا گاز حضور دارند و باعث بهبود تصویر توالی‌های دانه درشت (ماسه سنگ) می‌شوند) طراحی شده است [۱۵].

**موقعیت میدان مورد مطالعه**

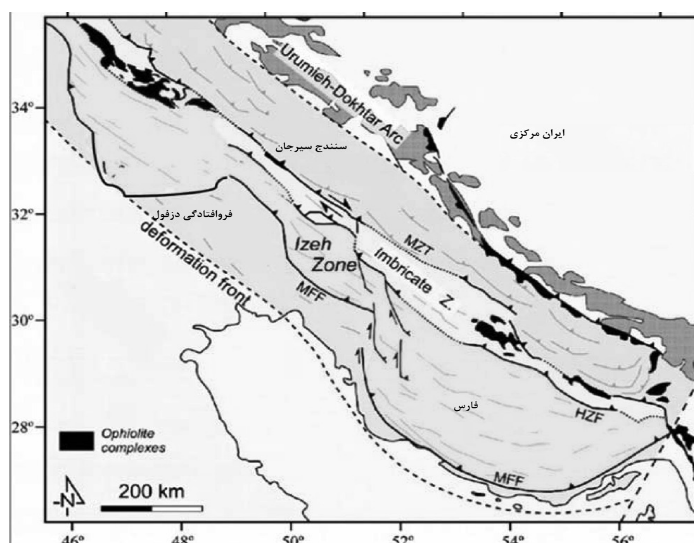
میدان مورد مطالعه در بخش شمالی فروافتادگی دزفول قرار دارد. فروافتادگی دزفول از دیدگاه زمین‌شناسی نفت حائز اهمیت زیادی بوده و بخشی از یک پیش گودال و یک ناحیه ساختمانی در قسمت جنوب غربی تراست زاگرس است. فروافتادگی دزفول به وسیله گسل بالارود در ناحیه شمال- شمال غرب و جبهه کوهستان در شمال شرق- شرق و گسل اصلی کازرون در شرق-جنوب شرق محدود گشته است. این منطقه دارای سنگ‌های منشاء فراوان، مخازن بسیار عالی و سنگ پوش مناسب است. در این میدان، سازند سروک مخزن اصلی محسوب می‌شود. در شکل ۱ موقعیت تقریبی میدان مورد مطالعه نشان داده شده است.

**چینه‌شناسی سازند سروک**

سازند سروک مخزن اصلی میدان مورد مطالعه است. این سازند یکی از واحدهای کربناته گروه بنگستان به سن آلبین تا سنومانین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سنگ مخزن‌های کربناته ایران است که در حوضه رسوبی زاگرس تا حوضه خلیج فارس دارای گسترش زیادی است. سازند سروک اولین بار توسط جیمز و وایند در ایران به نام آهک سروک معرفی گردید [۱۷]. نام این سازند از تنگ سروک در کوه بنگستان در ناحیه خوزستان گرفته شده است. حد پایینی این سازند در میدان مورد مطالعه با سازند کژدمی تدریجی و همساز است و مرز بالایی آن با شیل های لافان فرسایشی است. وجود یک ناپیوستگی موازی به سن پس از سنومانین در میان سازند سروک سبب شده تا این سازند به سروک پایینی (سنومانین) و سروک بالایی (تورونین) تقسیم شود [۱۸].

1. Inversion
2. Seismic – Attenuation
3. Rock Quality Factor
4. Envelope Attribute
5. RMS
6. Sweetness
7. Seismic Trace

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۲۸-۱۱۳




**شکل ۱** محدوده تقریبی میدان مورد مطالعه در فروافتادگی دزفول شمالی [۱۶]

سازند آهکی سروک در زاگرس معمولاً با دو رخسارۀ کم عمق و عمیق مشخص می‌شود. به لحاظ سنی سازند سروک از آلبین تا تورونین گسترش دارد [۱۹]. در میدان مورد مطالعه، این سازند عمدتاً دارای لیتولوژی کربناته است و از توالی آهک‌های نازک لایه تا متوسط لایه، آهک توده‌ای و آهک چرت دار تشکیل شده است. در این میدان، مخزن سروک ( با ضخامت حدود ۶۰۴ m) با توجه به قرارگیری بخش شیل احمدی در بخش میانی (با ضخامت حدود ۳۳ m)، به دو بخش سروک بالایی (با ضخامت حدود ۳۰۶ m) و سروک پایینی (با ضخامت حدود ۲۶۵ m) تقسیم شده است.

## روش و داده‌های مورد استفاده و مراحل تحقیق

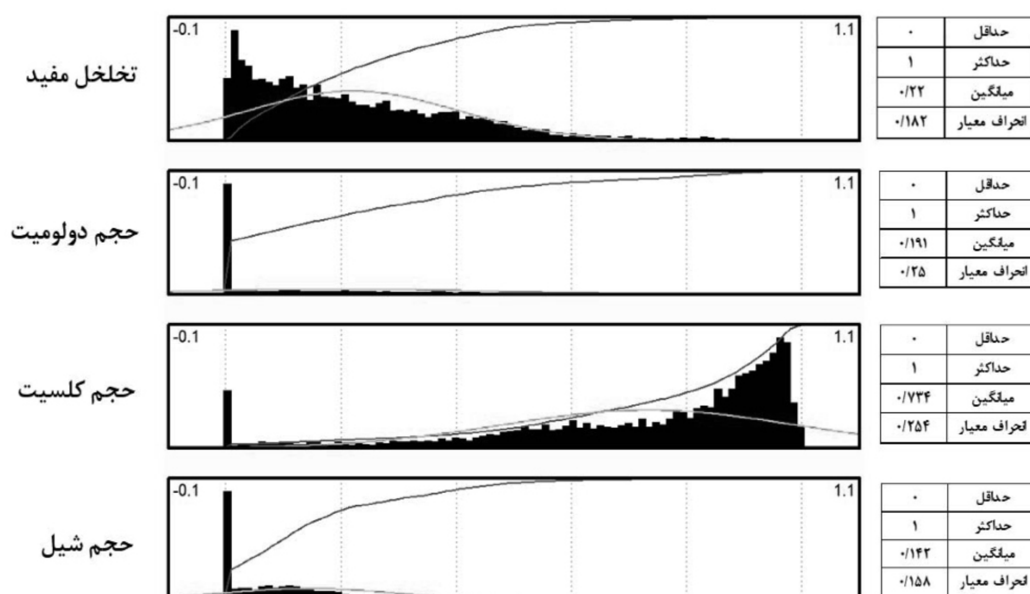
در این مطالعه از نرم‌افزارهای ژئولاگ و پترل استفاده گردید. نخست با استفاده از نرم‌افزار Geolog، آنالیز رخساره‌ای پتروفیزیکی با روش خوشه‌سازی MRGC انجام گردید. سپس رخساره‌های حاصل جهت استفاده در مدل‌سازی رخساره‌ای وارد نرم‌افزار پترل گردید. در این نرم‌افزار با ساخت نشان‌گرهای لرزه‌ای متعدد تلاش گردید توزیع تخلخل به‌عنوان تابعی از تغییرات رخساره‌های الکتریکی و لرزه‌ای انجام گیرد. به‌منظور ساخت مدل استاتیک از داده‌های سطوح عمقی تفسیر شده، داده‌های گسل‌های تفسیر شده، داده‌های مکعب لرزه‌ای، نگارهای پتروفیزیکی خام (از قبیل نگارهای پرتو گاما، نوترون، چگالی، صوتی، مقاومت و ... ) و تفسیر شده (از قبیل تخلخل مفید، اشباع آب، حجم کانی‌های و ...)، مشخصات چاه‌ها (مختصات سرچاهی، اعماق میز دوار از سطح آزاد دریا، داده‌های انحراف مسیرچاه‌ها)، اعماق سرسازندها و سرزون‌های مربوط به بیست چاه حفاری شده در این میدان استفاده گردید.

## ارائه و تحلیل نتایج

### تعیین رخساره‌های الکتریکی مخزن مورد مطالعه

در این مطالعه، خوشه‌سازی و تعیین رخساره‌های الکتریکی با استفاده از ماژول FACIMAGE ™ نرم‌افزار ژئولاگ انجام گرفت. از این رو، پس از آزمودن روش‌های مختلف در نهایت روش خوشه‌سازی چند تفکیکی بر پایه گراف MRGC برای تعیین تعداد رخساره‌های الکتریکی بهینه انتخاب گردید. در این روش داده‌های ورودی اعم از چندین نگار پتروفیزیکی پس از کنترل کیفی جهت خوشه‌بندی استفاده گردید. به‌طور کلی، خوشه‌سازی براساس MRGC یک روش آماری غیرپارامتریک است و برخلاف سایر روش‌ها، مشکل وابستگی به بعد را از بین می‌برد.

و اطلاعات مفیدی در مورد رخساره‌های زمین‌شناسی از ساختار خود داده به‌دست می‌آورد. این روش برای آنالیز ساختارهای پیچیده و دسته‌بندی طبیعی گروه‌های داده‌ها در شکل‌ها، اندازه‌ها و چگالی‌های متفاوت بسیار مناسب بوده و با شناسایی رخساره‌های رسوبی در یک توالی مخزنی، دید بهتری نسبت به شکل مخزن، پراکندگی خصوصیات پتروفیزیکی و سنگ‌شناسی سازند مخزنی و در نهایت، واحدهای جریانی موجود در آن سازند مخزنی پیدا می‌شود. برای تعیین رخساره‌های الکتریکی ابتدا داده‌های ورودی و مبنا انتخاب گردید. نگارهای پتروفیزیکی که بیشترین ارتباط را با خوشه‌بندی مورد نظر ما داشتند مورد بررسی قرارگرفتند و در نهایت تصمیم بر این شد که نگارهای تفسیر شده تخلخل، حجم شیل، حجم کانی دولومیت و حجم کلسیت به‌عنوان داده‌های ورودی انتخاب گردند. شناخت نوع لیتولوژی، محاسبه حجم شیل[1]، میزان تخلخل کل[2]، تخلخل مؤثر[3]، اشباع آب[4] مهم‌ترین پارامترهایی هستند که در ارزیابی پتروفیزیکی جهت پی بردن به کیفیت مخزنی سازندها تعیین می شوند [۲۰]. در شکل ۲ هیستوگرام‌های مربوط به نگارهای پتروفیزیکی تفسیر شده مورد استفاده در خوشه‌سازی نشان داده‌شده‌است. در مرحله بعد، داده‌های ورودی پس از بررسی و مشاهده نمودارهای متقاطع مربوطه (به‌منظور بررسی ارتباط داده‌های ورودی و میزان تفکیک رخساره‌ها) آموزش داده‌شدند (شکل ۳). پس از آموزش داده‌ها با استفاده از روش خوشه‌بندی تفکیکی گرافیکی MRGC، تعداد خوشه‌های بهینه مشخص گردید. این روش در مقایسه با سایر الگوریتم‌های خوشه‌بندی دارای کیفیت بهتری در تفکیک داده‌ها است [۲۱]. در این روش تعیین تعداد حداقل و حداکثر خوشه‌ها الزامی است. بنابراین، حداقل تعداد رخساره‌ها بر اساس تعداد کانی‌های حاصل از تفسیر لیتولوژی، سه رخساره (کلسیت، دولومیت، شیل) و حداکثر تعداد آن ۲۰ رخساره انتخاب گردید. بر این اساس، خوشه‌بندی با تعداد رخساره ۱۷ تایی از بین خوشه بندی‌های متعدد انتخاب گردید.




| | |
|---|---|
| حداقل | ۰ |
| حداکثر | ۱ |
| میانگین | ۰/۲۲ |
| انحراف معیار | ۰/۱۸۲ |

| | |
|---|---|
| حداقل | ۰ |
| حداکثر | ۱ |
| میانگین | ۰/۱۹۱ |
| انحراف معیار | ۰/۲۵ |

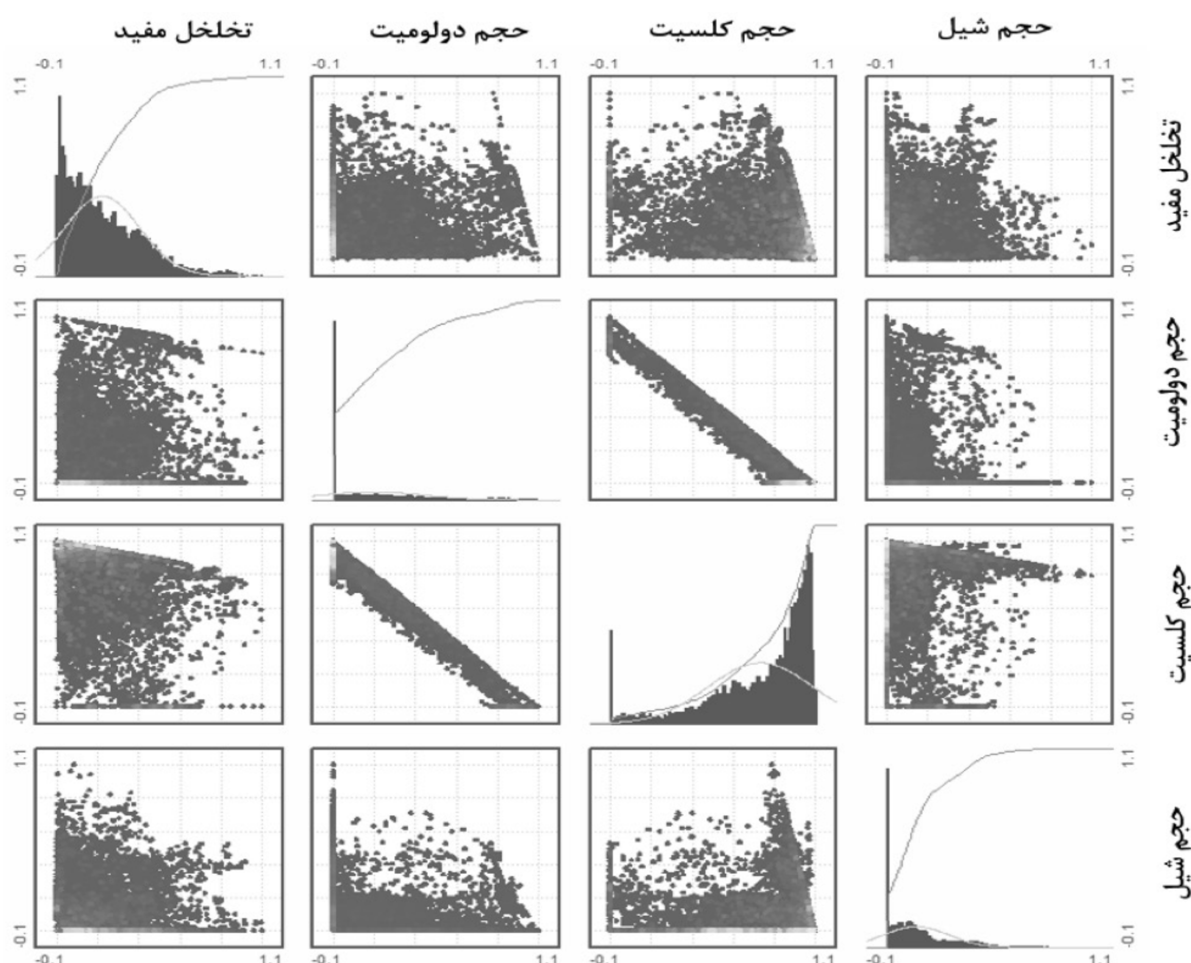
| | |
|---|---|
| حداقل | ۰ |
| حداکثر | ۱ |
| میانگین | ۰/۷۳۴ |
| انحراف معیار | ۰/۲۵۴ |

| | |
|---|---|
| حداقل | ۰ |
| حداکثر | ۱ |
| میانگین | ۰/۱۴۲ |
| انحراف معیار | ۰/۱۵۸ |

**شکل ۲** هیستوگرام توزیع داده‌های ورودی نرمال شده با روش MRGC جهت خوشه‌بندی

1. Shale volume (VSH)
2. Total Porosity (PHIT)
3. Effective Porosity (PHIE)
4. Water Saturation (Sw)

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۲۸-۱۱۳




**شکل ۳** نمودار متقاطع ماتریسی داده‌های ورودی

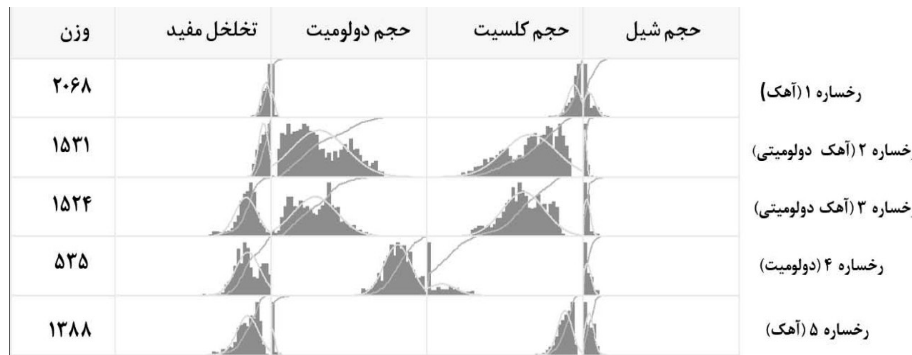
بررسی و مقایسه خوشه ها نشان داد که امکان تلفیق خوشه‌ها و کاهش آن به ۵ خوشه وجود دارد. بنابراین، پس از بررسی خوشه‌بندی ۱۷ رخساره‌ای، این نتیجه حاصل شد که بعضی از این دسته‌بندی‌ها، از لحاظ سنگ‌شناسی و کیفیت مخزنی بسیار شبیه به‌هم می‌باشند (شکل ۴). از این رو دسته‌های مشابه با یکدیگر ترکیب شدند و در نهایت پس از ادغام آنها خوشه‌بندی ۱۷ رخساره‌ای حاصل از روش MRGC به ۵ رخساره تبدیل شد. در شکل ۵ محدوده تغییرات تخلخل در هر رخساره نشان داده شده است.

مشخصات پنج رخساره الکتریکی حاصل از روش MRGC به شرح زیر است.

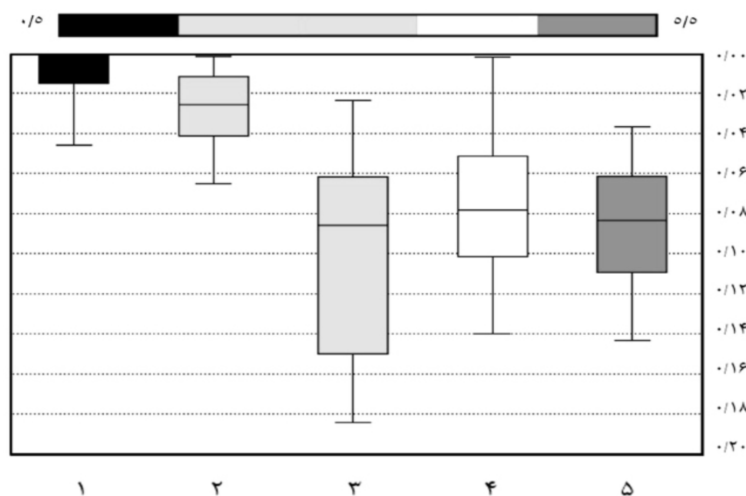
رخساره-۱: این رخساره با درصد گاما و میزان حجم شیل کمتر عمدتاً آهکی بوده و از ادغام ۶ رخساره الکتریکی در خوشه‌بندی ۱۷ تایی حاصل شده‌است (جدول ۱). رخساره-۱ دارای تخلخل ناچیز و کمتر از حد برش (حدود ۲٪) عملاً فاقد کیفیت مخزنی است.

رخساره-۲: این رخساره از جنس آهک دولومیتی بوده و از ادغام سه رخساره در خوشه‌بندی ۱۷ رخساره‌ای حاصل گردید. این رخساره همانند رخساره با میانگین تخلخل ۲٪ و کمتر از حد برش فاقد کیفیت مخزنی می‌باشد و صرفاً به‌دلیل وجود دولومیت از آن تفکیک شده است (جدول ۱).

رخساره-۳: این رخساره از جنس آهک دولومیتی بوده و از ادغام چهار رخساره در خوشه‌بندی ۱۷ رخساره‌ای حاصل گردیده است. این رخساره با میانگین تخلخل ۸٪ کیفیت مخزنی بالایی داشته و از رخساره ۲ قابل تفکیک می‌باشد (جدول ۱).




**شکل ۴** هیستوگرام و دامنه تغییرات داده‌های ورودی توزیع داده‌های ورودی با روش MRGC در هر رخساره و روند تلفیق ۱۷ رخساره‌ای به ۵ رخساره‌ای




**شکل ۵** هیستوگرام جعبه‌ای تغییرات تخلخل در هر رخساره

**جدول ۱** میانگین داده‌های ورودی در هر رخساره

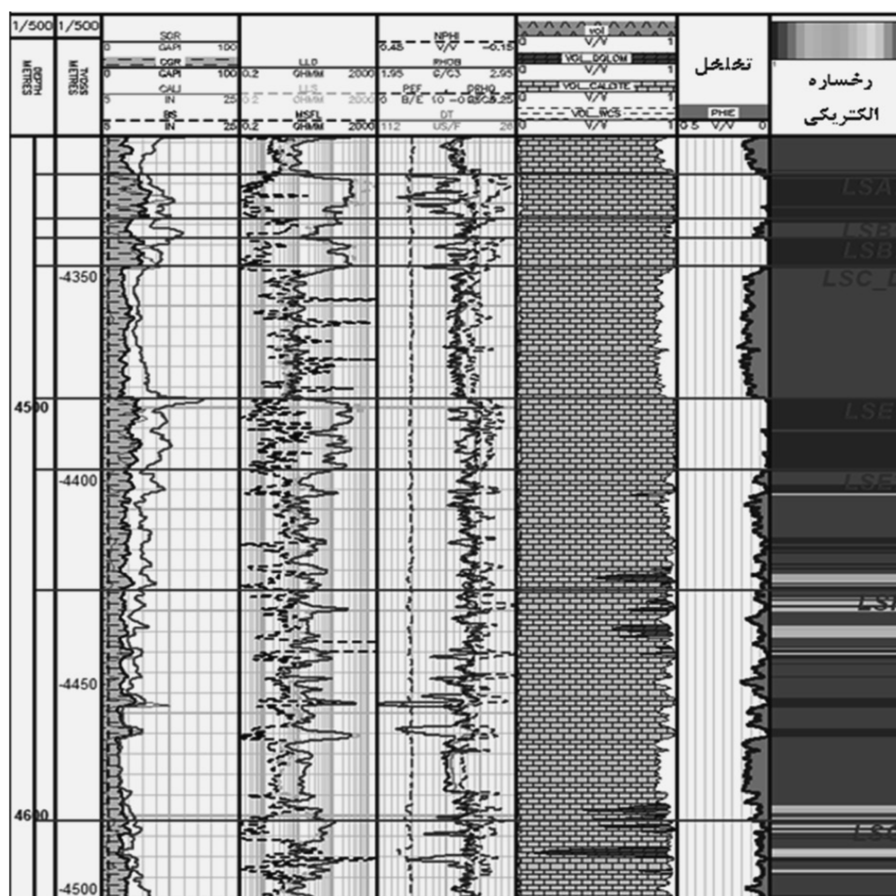
| رخساره | تخلخل مفید | حجم دولومیت | حجم کلسیت | حجم شیل |
|---|---|---|---|---|
| رخساره ۱ (آهک کم تخلخل) | ۰/۰۲ | ۰ | ۰/۹۴ | ۰/۰۴ |
| رخساره ۲ (آهک دولومیتی کم تخلخل) | ۰/۰۲ | ۰/۳۱ | ۰/۶۶ | ۰/۰۱ |
| رخساره ۳ (آهک دولومیتی با تخلخل بالا) | ۰/۰۸ | ۰/۲۸ | ۰/۶۲ | ۰/۰۲ |
| رخساره ۴ (دولومیت) | ۰/۰۷ | ۰/۸۱ | ۰/۰۹ | ۰/۰۲ |
| رخساره ۵ (آهک با تخلخل بالا) | ۰/۰۸ | ۰/۰۱ | ۰/۸۸ | ۰/۰۴ |

رخساره-۴: این رخساره دولومیتی است و با میانگین تخلخل (۷٪) دارای کیفیت مخزنی نسبتاً خوبی است (جدول ۱).

رخساره-۵: این رخساره عمدتاً آهکی بوده و با میانگین تخلخل (۷٪) دارای کیفیت مخزنی نسبتاً خوبی است و به‌دلیل اختلاف لیتولوژی از رخساره ۴ تفکیک می‌گردد (جدول ۱). در شکل ۶ رخساره‌های الکتریکی ایجاد شده در یک پنجره چیدمانی[1] در یکی از چاه‌های میدان به‌همراه داده‌های سنگ‌شناسی، کیفیت مخزنی (تخلخل) نمایش داده شده است.

1. layout

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۲۸-۱۱۳




**شکل ۶** نمایش رخساره‌های الکتریکی به‌همراه نگار تخلخل، نگارهای لیتولوژی و نگارهای خام

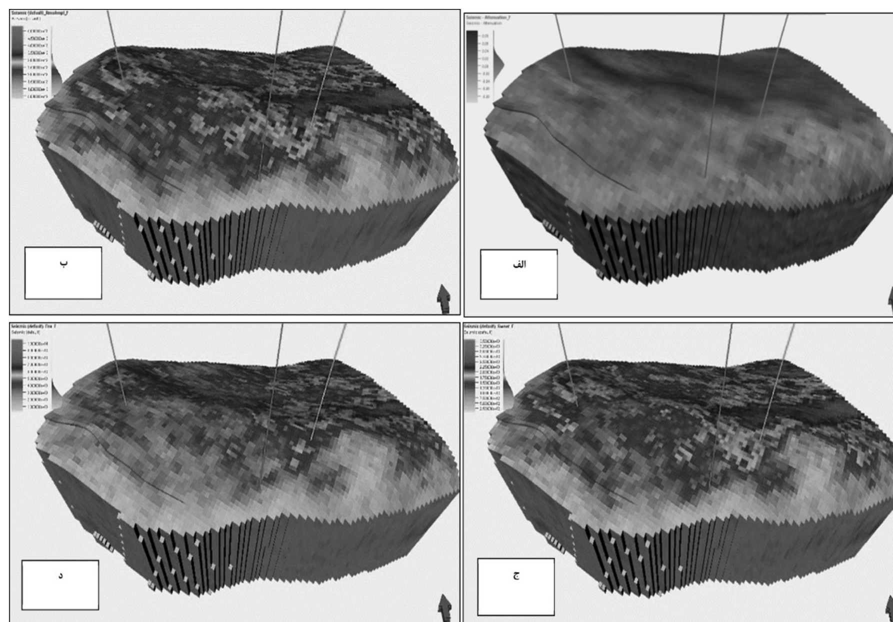
### ساخت نشان‌گرهای لرزه‌ای

در این مطالعه، نخست با استفاده از نرم‌افزار پترل تعدادی نشان‌گر لرزه‌ای که به نوعی با توزیع تخلخل ارتباط داشتند از روی داده‌های مکعب لرزه‌ای با استفاده از ماژول ساخت نشان‌گرهای حجمی[1] تهیه گردید. نشان‌گر تضعیف موج لرزه‌ای، نشان‌گر پوش لرزه‌ای و نشان‌گر دامنه RMS به‌همراه نشان‌گر مقاومت صوتی پس از تهیه توسط شبکه عصبی پترل به یک نشان‌گر تبدیل شدند تا نشان‌گر نهایی تلفیقی از اثرات هرکدام از آنها باشد (شکل ۷). ادغام این نشان‌گرها به یک نشان‌گر نماینده از طریق شبکه عصبی نرم‌افزار پترل انجام گردید. از مدل حاصل برای هر دو بخش سروک بالایی و سروک پایینی نخست نقشه میانگین تهیه گردید و در نهایت پس از نرمال کردن به نقشه‌های روندی تبدیل گردید. با توجه به رابطه عکس نشان‌گر مقاومت صوتی با تخلخل، روند تغییرات این نقشه‌ها ارتباط عکس با روند توزیع تخلخل دارد، به‌طوری‌که افزایش آن نشان‌دهنده کاهش تخلخل و کاهش آن نشان‌دهنده وجود بخش‌های با کیفیت مخزنی بالا می‌باشد. این نقشه‌های روندی جهت توزیع رخساره‌های الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت.

### مدل‌سازی خواص مخزنی

نرم‌افزارهای مدل‌سازی استاتیک نظیر پترل یک دید سه‌بعدی از زمین‌شناسی و ساختمان مخزن و نیز نحوه توزیع پارامترهای مخزنی به کاربر ارائه داده و امکان محاسبه حجم مخزن را فراهم می‌کنند. به‌طور کلی، مدل‌سازی استاتیک مخزن شامل ایجاد مدل ساختمانی[2] و مدل خواص مخزن و نهایتاً حجم سنجی و آنالیز عدم قطعیت است.

1. Volume Attribute
2. Structural Modeling



**شــکل ۷** نشـان‌گرهای لـرزه‌ای الـف) نشـان‌گر تضعیـف مـوج لـرزه‌ای، ب) نشـان‌گر دامنـه جـذر میانگـن مربعـات ج) نشـان‌گر نرمـی و د) نشـان‌گر پـوش لـرزه‌ای

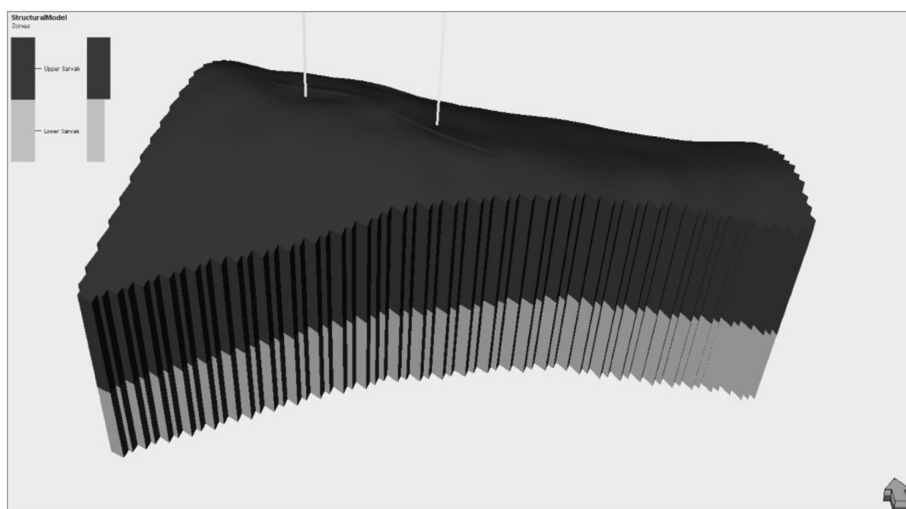
انجـام مدل‌سـازی اسـتاتیک مخزنـی معمـولاً بـا آمـاده کـردن داده‌هـای مختلـف بـا فرمت‌هـای متناسـب و وارد کـردن آنهـا بـه نرم‌افـزار شـروع می‌شـود پـس از وارد نمـودن داده‌هـای مختلـف، سـاخت مـدل سـاختمانی آغـاز می‌گـردد. فرآینـد مدل‌سـازی سـاختمانی شـامل مراحـل مدل‌سـازی گسـل، سـاخت مـدل ژئوسـلولار سـه‌بعدی[1]، سـاخت افق‌هـای مخزنـی[2]، سـاخت زون‌هـا[3] و لایه‌بنـدی[4] اسـت [۲۲]. در ایـن مطالعـه، مـدل سـاختمانی بـا شـبکه‌بندی ۱۰۰×۱۰۰ سـاخته شـد و مدل‌سـازی افق‌هـا بـا اسـتفاده از نقشـه‌های سـطوح عمقـی انجـام گرفـت (شـکل ۸). پـس از سـاخت مـدل سـاختمانی، داده‌هـای رخسـاره الکتریکـی و تخلخل بـه انـدازه سـلول‌های شـبکه درشـت مقیـاس (میانگین‌گیـری) شـدند [۲۳]. پـس از درشـت نمایـی ایـن نگارهـا، آنالیـز آمـاری[5] داده هـا صـورت می‌گیـرد. آنالیـز آمـاری داده‌هـا یـک مرحلـه مهـم در مدل‌سـازی مخـزن اسـت کـه در کنتـرل کیفیـت داده‌هـا، بررسـی رونـد آنهـا و آماده‌سـازی داده‌هـای ورودی بـرای مدل‌سـازی پتروفیزیکـی و رخسـاره‌ها کمـک فراوانـی می‌نمایـد. بنابرایـن داده‌هـا ابتـدا درون نرم‌افـزار پتـرل به‌صـورت نرمـال درآمـده و رونـد ممکـن در آنهـا حـذف می‌گـردد و سـپس در سـه جهـت اصلـی، فرعـی و عمـودی واریوگرافـی انجـام گردیـد. واریوگـرام، تغییرپذیـری داده‌هـا را بـا افزایـش فاصلـه نشـان می‌دهـد کـه یـک محـور آن تغییرپذیـری واریانـس و محـور دیگـر فاصلـه اسـت. در توزیـع خـواص مخزنـی در مخـازن هیدروکربنـی واریوگرافـی به‌صـورت افقـی (در دو جهـت) و عمـودی انجـام می‌شـود. واریوگـرام از مقـداری مخالـف صفـر شـروع شـده و بـه انـدازه دامنـه تاثیـر[6] افزایـش می‌یابـد و در نهایـت بـه مقـدار ثابتـی به‌نـام سـقف[7] می‌رسـد.

### مدل‌سازی رخساره‌های الکتریکی و تخلخل

مدل‌سـازی رخسـاره‌ای[8] پـس از سـاخت مـدل سـاختمانی و پیـش از مدل‌سـازی خـواص پتروفیزیکـی انجـام می‌گیـرد. داده‌هـای رخسـاره‌های الکتریکـی پیـش از مدل‌سـازی برحسـب فراوانـی رخسـاره[9] درشـت نمایـی شـده اسـت.

1. Gridding
2. Make Horizon
3. Zonation
4. Layering
5. Data Analysis
6. Range
7. Sill
8. Facies Modelling
9. Most of

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۲۸-۱۱۳



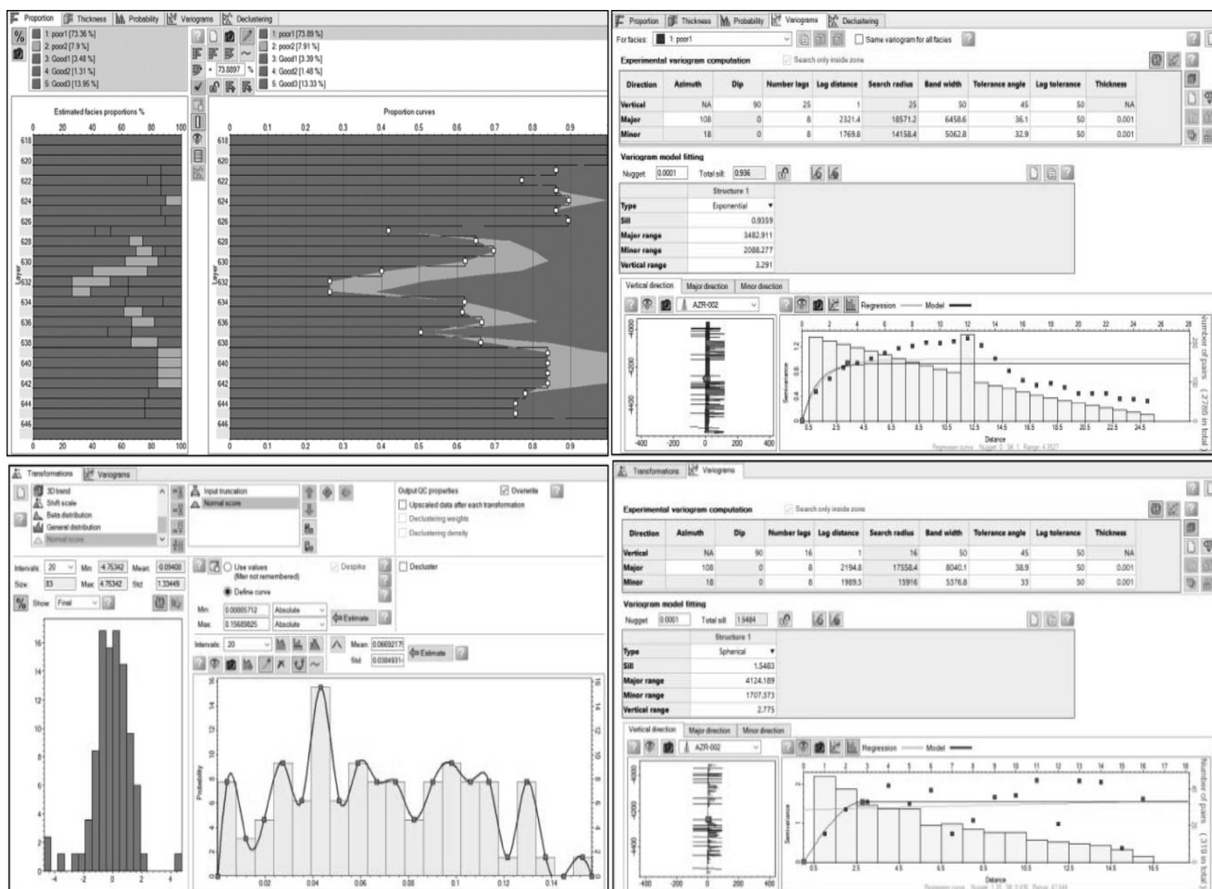

**شکل ۸** مدل ساختمانی مخزن سروک در میدان مورد مطالعه

سپس در بخش آنالیز داده‌ها واریوگرافی می‌شوند. در مدل‌سازی رخساره‌ای گسسته، توزیع رخساره‌ها با استفاده از روش‌های زمین آماری قطعی[1] و تصادفی یا آماری[2] و یا شبیه‌سازی انجام می‌گیرد. در روش قطعی فقط یک خروجی از مدل‌سازی حاصل می گردد، ولی در روش توزیع تصادفی ممکن است برحسب شرایط داده‌ها مدل ایجاد گردد و سپس از آنها میانگین‌گیری شود. از ویژگی‌های روش تصادفی این است که مدل واقعی‌تر از ناهمگنی مخزن ایجاد می‌کند [۲۴]. روش‌های شبیه‌سازی زیادی وجود دارد که می‌توان به شبیه‌سازی شاخص ترتیبی[3] و شبیه‌سازی گوسین منقطع[4] اشاره کرد. در این روش‌ها از واریوگرام برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. مدل‌های رخساره‌ای حاصل جهت کنترل توزیع خواص پتروفیزیکی و تاثیر زمین‌شناسی در توزیع زمین آماری آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند. براساس آنالیز رخساره‌های الکتریکی که بیان گردید، رخساره‌های ساخته شده برحسب میزان تغییرات دولومیت و تخلخل به ۵ رخساره تفکیک شدند. از بین آنها ۲ رخساره کیفیت پایین و سه رخساره کیفیت خوبی داشتند. رخساره‌های با تخلخل خوب با مقدار مقاومت صوتی پایین و رخساره‌های بد دارای تخلخل کمتر با مقاومت صوتی بالا تطابق دارند. بنابراین برای هر کدام از زون‌های مخزنی نقشه روندی براساس تغییرات مقاومت صوتی و نشان‌گر حاصل از تجمیع ۴ نشان‌گر ساخته شده، تهیه گردید. این روندها برای توزیع هرکدام از رخساره‌ها به‌صورت سه‌بعدی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین توزیع هر کدام از این رخساره‌ها به تخلخل لینک گردید تا روند تغییرات رخساره‌ها با تخلخل هم‌خوانی داشته باشند. از این رو، هر کدام از کدهای رخساره‌ای به‌صورت جداگانه مورد آنالیز واریوگرافی قرار گرفت تا بتوان با آنالیز واریوگرافی تخلخل مربوطه امکان تبعیت توزیع تخلخل از توزیع رخساره‌های الکتریکی فراهم گردد (شکل ۹). شایان ذکر است، استفاده از نقشه‌های روندی تغییرات مقاومت صوتی منجر به توزیع صحیح رخساره‌های الکتریکی و آن هم به نوبه خود منجر به توزیع بهتر تخلخل می‌گردد.

**مدل‌سازی تخلخل**

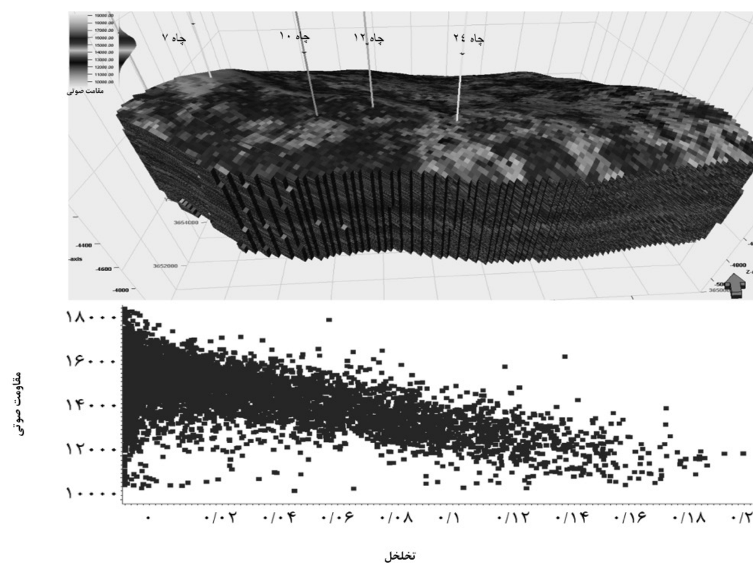
استفاده از مدل رخساره الکتریکی که با استفاده از نقشه‌های روندی حاصل از مقاومت صوتی تهیه گردیده است.

1. Deterministic
2. Stochastic
3. Sequential Indicator Simulation (SIS))
4. Truncated Gaussian Simulation (TGS)

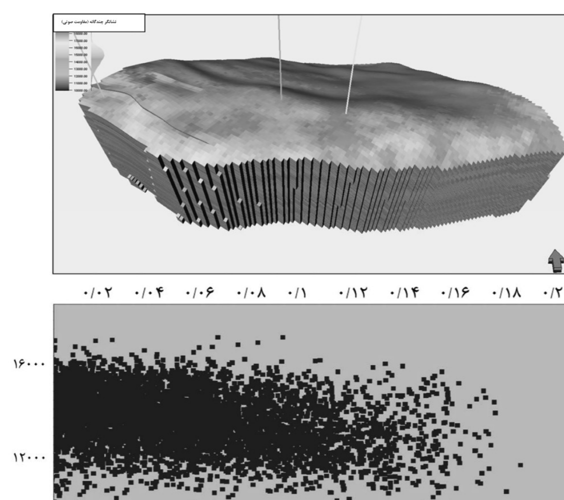


**شکل ۹** تنظیمات مربوط به واریوگرافی نگارهای رخساره الکتریکی و تخلخل

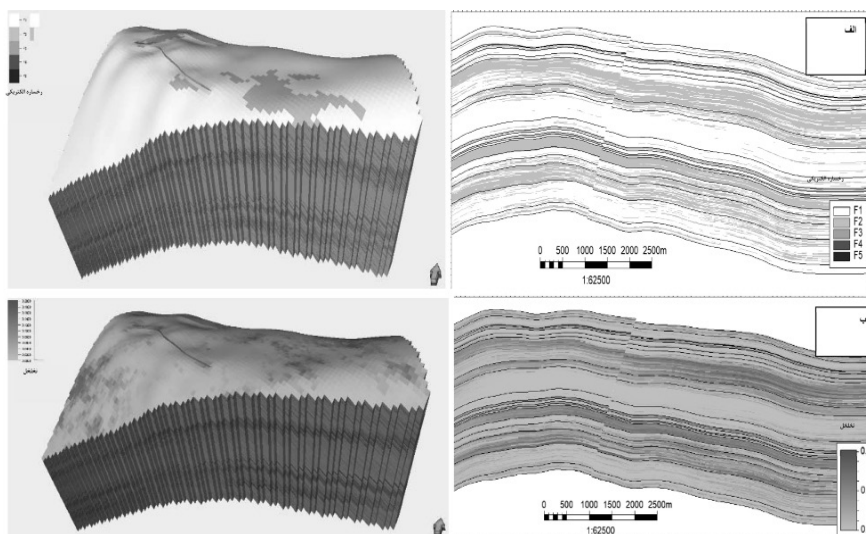
به‌دلیل استفاده همزمان از داده‌های پتروفیزیکی و لرزه‌ای (به‌صورت نقشه‌های روندی) اهمیت فراوانی در کاهش عدم قطعیت مدل تخلخل دارد. در واقع هدف از مدل‌سازی تخلخل این است تا این خاصیت مخزنی را بین چاه‌های موجود طوری توزیع کنیم که ضمن حفظ ناهمگنی مخزن در توافق با داده‌های چاه باشند. از آنجا که در بخش آنالیز واریوگرافی، توزیع تخلخل متاثر از توزیع رخساره‌های الکتریکی بود، لذا توزیع تخلخل در فضای سه‌بعدی مدل به نوعی متاثر از تغییرات مقاومت صوتی هم بوده است. با توجه به یکسان بودن روند تغییرات نشان‌گرهای لرزه‌ای با مقاومت صوتی و به‌دلیل میزان همبستگی حدود ۶۴٪ تخلخل با داده‌های مقاومت با استفاده از روش کریجینگ همزمان مرتب از داده‌های مقاومت صوتی به‌عنوان داده ثانویه جهت توزیع بهتر تخلخل استفاده گردید (شکل ۱۰). استفاده از داده ثانویه مقاومت صوتی که نسبت به داده‌های نگار تخلخل چاه دارای حجم بیشتر اما دقت کمتری می باشد، منجر به توزیع صحیح و قابل اعتماد تخلخل شده و از میزان عدم قطعیت توزیع تخلخل می‌کاهد. شایان ذکر است میزان همبستگی تخلخل با نشان‌گر ساخته شده از مجموع نشان‌گرها ۴۵٪ بوده است که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. به‌طور کلی، می‌توان گفت مسیری که برای مدل‌سازی تخلخل استفاده گردید هم به‌صورت افقی از روند تغییرات نشان‌گرهای لرزه‌ای و هم به‌صورت سه‌بعدی از روند تغییرات مقاومت صوتی استفاده می‌کند. نتیجه این روش کاهش مقدار عدم قطعیت در خارج از دامنه واریوگرافی و حصول اطمینان بیشتر از صحت توزیع تخلخل می باشد. مدل تخلخل با استفاده از روش زمین آماری تصادفی GRFS توزیع گردید (شکل ۱۲).




**شکل ۱۰** نمایش مکعب لرزه‌ای مقاومت صوتی به‌همراه نمودار متقاطع همبستگی نگار مقاومت صوتی با تخلخل مفید (۶۴٪)

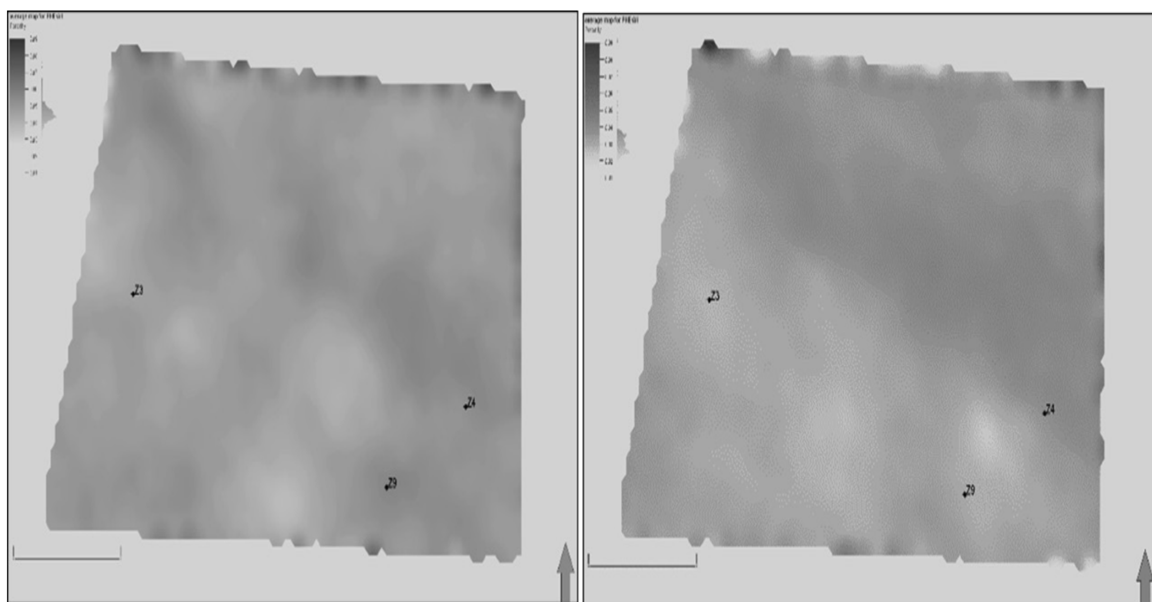


**شکل ۱۱** نمایش مکعب لرزه‌ای نشان‌گرهای لرزه‌ای به‌همراه نمودار متقاطع همبستگی آن با تخلخل مفید (۴۵٪)

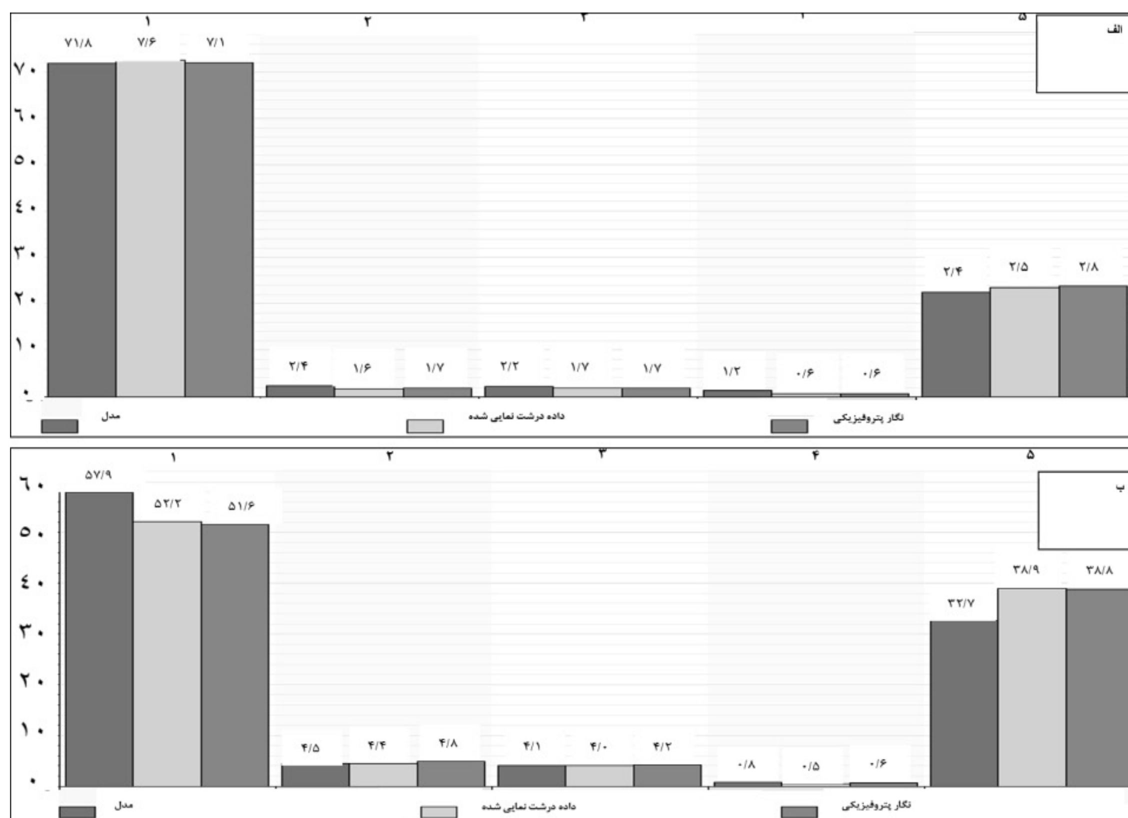



**شکل ۱۲** توزیع سه‌بعدی مدل رخساره الکتریکی (الف) و تخلخل (ب)

این روش باعث افزایش دقت توزیع نسبت به‌روش‌های قطعی می شود [۲۵]. شایان ذکر است این روش نیاز به نرمال‌سازی استاندارد داده‌های مورد استفاده دارد [۲۶]. پس از ساخت مدل تخلخل، نقشه میانگین تغییرات تخلخل برای سروک بالایی و سروک پایینی تهیه گردید. همان‌طوری‌که در شکل ۱۳ دیده می‌شود در سروک بالایی از جنوب غرب به‌سمت شمال شرق میزان تخلخل زیاد می‌شود. اما در سروک پایینی روند خاصی ملاحظه نمی‌گردد؛ اگر چه در مرکز میدان و در راستای جنوب شرقی به‌سمت شمال غربی بر میزان تخلخل افزوده می‌شود (به‌دلیل عملکرد فرآیندهای دیاژنزی). به‌طور کلی، بخش سروک پایینی کیفیت مخزنی بهتری نسبت به بخش سروک بالایی دارد. درصد رخساره‌های با کیفیت مخزنی پایین (رخساره ۱ و ۲) در سروک بالایی نسبت به سروک پایینی بیشتر بوده و نسبت رخساره‌های رخساره‌های با کیفیت مخزنی بالا (رخساره‌های ۳ ، ۴ و ۵) در سروک پایینی نسبت به سروک بالایی بیشتر است (شکل ۱۴). این مطالعه نشان داد از آنجا که مدل تخلخل ساخته شده متاثر از توزیع رخساره‌های الکتریکی، روند تغییرات مقاومت صوتی حاصل از تفسیر لرزه‌ای و نیز استفاده از الگوریتم زمین آماری مناسب است، دارای عدم قطعیت پایینی بوده و می‌توان از آن با اطمینان بیشتر در ادامه مدل‌سازی استاتیک و محاسبات حجم سنجی استفاده کرد.



**شکل ۱۳** نقشه توزیع افقی تخلخل در سروک بالایی (الف) و سروک پایینی (ب)




**شکل ۱۴** میزان توزیع رخساره ها در سروک بالایی الف) و سروک پایینی ب) برای داده های نگار، درشت نمایی شده و مدل شده

## نتیجه‌گیری

* براساس آنالیز رخساره‌های الکتریکی با استفاده از روش خوشه‌بندی MRGC برحسب میزان تغییرات دولومیت و تخلخل پنج رخساره تشخیص داده شد.

* رخساره‌های الکتریکی یک و دو با دارا بودن تخلخل ناچیز و کمتر از حدبرش فاقد کیفیت مخزنی می‌باشند. اما رخساره‌های سه، چهار و پنج با میانگین تخلخل بالاتر دارای کیفیت مخزنی نسبتاً خوبی بوده و به‌دلیل اختلاف لیتولوژی (آهک و دولومیت) از همدیگر تفکیک گردیدند.

* نشان‌گر وارون‌سازی لرزه‌ای، تضعیف موج لرزه‌ای، پوش لرزه‌ای و دامنه RMS به‌همراه نشان‌گر مقاومت صوتی پس از تهیه توسط شبکه عصبی پترل به یک نشان‌گر تبدیل شدند و سپس براساس آن نقشه‌های روندی جهت توزیع رخساره‌های الکتریکی و تخلخل تهیه گردید.

* با توجه به رابطه عکس مقاومت صوتی با تخلخل، نقشه‌های روندی تهیه شده براساس تغییرات مقاومت صوتی جهت توزیع رخساره‌های الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت.

* در توزیع سه‌بعدی تخلخل تلاش گردید هر کدام از رخساره‌های الکتریکی از طریق آنالیز واریوگرافی به توزیع میزان تخلخل لینک گردد تا روند تغییرات رخساره‌ها با تخلخل هم‌خوانی داشته باشد. استفاده از نقشه‌های روندی تغییرات مقاومت صوتی منجر به توزیع صحیح رخساره‌های الکتریکی و آن هم به نوبه خود منجر به توزیع بهتر تخلخل می‌گردد.

* به‌دلیل همبستگی بالای تخلخل با داده‌های مقاومت صوتی از این داده به‌عنوان داده ثانویه با استفاده از روش کریجینگ هم‌زمان مرتب جهت توزیع بهتر تخلخل استفاده گردید.

* در سروک بالایی از جنوب غرب به‌سمت شمال شرق میزان تخلخل زیاد می‌شود. اما در سروک.

پایینی روند خاصی ملاحظه نمی‌گردد؛ اگر چه در مرکز میدان و در راستای جنوب شرقی به‌سمت شمال غربی بر میزان تخلخل افزوده می‌شود.
* کیفیت مخزنی سروک پایینی به‌دلیل گسترش رخساره‌های مخزنی خوب نسبت به سروک بالایی بیشتر می‌باشد.
* از مدل تخلخل ساخته شده به‌دلیل استفاده هم‌زمان و تلفیقی از نقشه‌های تغییرات مقاومت صوتی، مدل رخساره الکتریکی، کریجینگ هم‌زمان مرتب جهت استفاده از داده ثانویه مقاومت صوتی و نیز الگوریتم زمین آماری مناسب (GRFS) می‌توان با اطمینان بیشتر در ادامه مدل‌سازی استاتیک و محاسبات حجم سنجی استفاده کرد.

**تشکر و قدردانی**

بدین‌وسیله از شرکت مهندسی و توسعه سروک آذر و زحمات آقای مهندس کرکوتی و آقای مهندس شوراب به‌دلیل همکاری در تهیه این مقاله تقدیر و قدردانی می‌شود

**مراجع**

[1]. Kaufmann O, Martin T (2008) 3D Geological Modelling From Boreholes, Cross-Sections And Geological Maps, Application over Former Natural Gas Storages in Coal Mines. Computers and Geosciences 34, 3: 278–290.
[2]. Costa J F, Zingano A C, KOPPE J C (2000) Simulation—an approach to risk analysis in coal mining, Exploration and Mining Geology, 9, 1, 43-49.
[3]. Pyrcz M J, Deutsch C V (2014) Geostatistical reservoir modeling, Oxford university press.
[4]. GhojehBeyglou M (2021) Geostatistical modeling of porosity and evaluating the local and global distribution, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 11, 12: 4227-4241.
[5]. Evans Annan B, Aidoo A, Ejeh C, Emmanuel A, Ocran D (2019) Mapping of porosity, permeability and thickness distribution: application of geostatistical modeling for the jubilee oilfield in Ghana, Geosciences 9, 2: 27-49.
[6]. Daly C, Quental S, Novak D, (2010) A faster, more accurate Gaussian simulation. In: proceedings of the geocanada conference, calgary, AB, Canada, 10–14.
[7]. Grader A S, Clark A B S, Al-Dayyani T, Nur A (2009) Computations of porosity and ermeability of sparic carbonate using Multi-Scale CT images, International Symposium of the Society of Core Analysts, The Netherlands 27-30 September, SCA2009-Temp Paper#03-10, 10.
[8]. GhojehBeyglou M (2021) Geostatistical modeling of porosity and evaluating the local and global distribution, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 11, 12: 4227-4241.
[9]. Evans Annan B, Aidoo A, Ejeh C, Emmanuel A, Ocran D (2019) Mapping of porosity, permeability and thickness distribution: application of geostatistical modeling for the jubilee oilfield in Ghana, Geosciences, 9, 2: 27-49.
[10]. Skalinski M, Kenter J A M (2014) Carbonate petrophysical rock typing: integrating geological attributes and petrophysical properties while linking with dynamic behaviour, Geological Society, London, Special Publications, 406: 229–259.
[11]. Kadkhodaie A, Kadkhodaie R (2018) Review of reservoir rock typing methods in carbonate reservoirs: relation between geological, seismic, and reservoir rock types, Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology, 7, 4: 13-35.
[12]. Russell B, Hampson D P, Schuelke J S, Quirein J A (1997) Multi-attribute seismic analysis, The leading Edge, 16, 1439-1443.
[13]. Batzle M, Hofmann R, Prasad M, Kumar G, Duranti L, Han D H (2005) Seismic attenuation: observations and mechanisms, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1565-1568.
[14]. Raji W, Rietbrock A (2013) Attenuation (1/Q) estimation in reflection seismic records, Journal of Geophysics and Engineering, 10, 4: 045012.
[15]. Koson S, Chenrai P, Choowong M (2014) Seismic attributes and their applications in seismic geomorphology, Bulletin of Earth Sciences of Thailand, 6, 1: 1-9.
[16]. Casini G, Gillespie P A, Verges A, Romaire I, Fernandez N, Casciello E, Saura E, Mehl C, Homke S, Embry J C, Aghajari L, Hunt D W (2011) Sub-seismic fractures in foreland fold and thrust belts: insight from the Lurestan Province, Zagros Mountains, Iran, Petroleum Geoscience, 17: 263–282.
[17]. James G A, Wynd J G (1965) Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area, AAPG Bull, 49: 2182-2245.

[۱۸]. آقانباتی ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶.

[۱۹]. مطیعی ه (۱۳۷۲)، زمین‌شناسی ایران، چینه‌شناسی زاگرس، سازمان زمین‌شناسی کشور، طرح تدوین کتاب، تهران، ۵۳۶.

[20]. Hearst J R, Nelson P H, Paillet F L (2000) Well logging for physical properties: a handbook for geophysicists, geologists, and Engineers, New York, John Wiley and Sons, 483.

[۲۱]. ادب‌نژاد پ، کدخدائی ع، نوروزی غ م رستمی ا ش (۱۳۹۷) مدل‌سازی سه‌بعدی واحدهای ژئومکانیکی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای در یکی از میادین گازی جنوب ایران. پژوهش نفت، ۲۸، (۹۷-۱)، ۹۶-۸۵..

[۲۲]. مهدی‌پور و، هاشمیان خ (۱۳۹۳) مقایسه مراحل انجام مدل‌سازی استاتیک مخازن هیدروکربنی با استفاده از نرم‌افزارهای RMS و PETREL، سومین کنفرانس مهندسی مخزن، تهران، ایران.

[23]. Kadkhodaie-Ilkhchi R, Kadkhodaie A, Rezaee M R, Mehdipour V (2019) Unraveling the reservoir heterogeneity of the tight gas sandstones using the porosity conditioned facies modeling in the Whicher Range field, Perth Basin, Western Australia, Journal of Petroleum Science and Engineering, 176: 97-115.

[24]. Iske A, Randen T (2005) Mathematical methods and modelling in hydrocarbon exploration and production, Springer Berlin Heidelberg New York.

[25]. Zhao S, Zhou Y, Wang M, Xin X, Chen F (2014) Thickness, porosity, and permeability prediction: comparative studies and application of the geostastical modeling in an oil field, Environmental Research Systems, 3: 7.

[26]. Oliver M A (2010) Geostatistical applications for precision agriculture, Springer Science and Business Media.

# بهینه‌سازی جداسازی آسفالتین از باقیمانده برج تقطیر در خلأ با استفاده از استخراج مایع-مایع به روش سطح-پاسخ

رضا عسگری[۱]، وهب قلعه خندابی[۲]، علیرضا فضلعلی[۲*] و محمودرضا نیک خلق[۳] و عبدالرضا مقدسی[۲]

۱- مهندسی فرایند، شرکت پالایش نفت شازند، اراک، ایران

۲- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، ایران

۳- گروه مهندسی شیمی، شرکت اکسیرپویان، اراک، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۲

**چکیده**

در این پژوهش، بهینه‌سازی فرآیند جداسازی آسفالتین از باقی‌مانده برج تقطیر خلأ با استفاده از حلال‌های صنعتی نرمال پنتان، هگزان و هپتان انجام شده است. از طراحی مرکب مرکزی به عنوان یکی از روش‌های طراحی آزمایش سطح-پاسخ، برای بهینه‌سازی فرآیند استفاده شده است. درصد وزنی آسفالتین باقیمانده و درصد بازدهی نفت آسفالتین‌زدایی شده تحت شرایط بهینه اقتصادی (حلال نرمال هگزان، نسبت حلال به خوراک برابر با 5/9 mL/g و دمای استخراج 25 °C) به ترتیب ۰/۴۴۷ و ۴۸٪ حاصل شدند. تحلیل نتایج نشان داد که مدل درجه دوم پاسخ برای پارامترهای مورد مطالعه قابل قبول است و مطابقت زیادی بین مدل ریاضی و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. به‌علاوه، طبق آنالیز واریانس، دمای استخراج و برهم‌کنش درجه دوم پارامتر نسبت حلال به خوراک، تأثیر چشمگیری بر درصد وزنی آسفالتین دارند. علاوه بر این، نتایج نشان داد که رویکرد معرفی‌شده یک روش کارآمد و اقتصادی برای افزایش ظرفیت واحد شکست کاتالیستی باقیمانده‌ها و تولید قیر مرغوب می‌باشد.

**کلمات کلیدی: آسفالتین‌زدایی توسط حلال، باقیمانده برج تقطیر خلأ، بهینه‌سازی، حلال‌های صنعتی، قیر.**

## مقدمه

قوانین زیست محیطی و بحران انرژی، کشورهای تولید کننده فرآورده‌های نفتی را به بهبود کیفیت باقیمانده‌های سنگین پالایشگاهی ملزم ساخته است. ایران نیز با توجه به حجم زیاد باقیمانده‌های سنگین، واحدهای بهبود کیفیت این فرآورده‌ها را توسعه داده است. از فرآیندهای رایج بهبود کیفیت، فرآیندهای کاتالیستی هستند، اما به دلیل وجود آسفالتین، فلزات سنگین، گوگرد و نیتروژن، لازم است که میزان این ترکیبات به حد قابل قبولی کاهش یابد. رسوب آسفالتین باعث ایجاد کک در مبدل‌های حرارتی، ستون‌های تقطیر، گرفتگی فیلترها و همچنین باعث غیرفعال شدن سطح کاتالیست می‌شود. به‌منظور جلوگیری از رسوب

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی a-fazlali@araku.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4733.3125)

آسفالتین در تجهیزات فرآیندی، لازم است قبل از ورود ته مانده برج تقطیر در خلأ (VB) به واحدهای پالایشگاهی، آسفالتین موجود در آن را با روش‌های مختلف، تا حد مطلوب کاهش داد، که یکی از این روش‌ها فرآیند آسفالتین زدائی با حلال‌های پارافینی[1] (SDA) می‌باشد. محصول این فرآیند، خوراک واحدهای روغن‌سازی و شکست کاتالیستی با حضور هیدروژن یا بدون آن است [۱].

بر اساس آنالیز سارا، ترکیبات شیمیایی در نفت خام به چهار گروه اصلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از: ترکیبات اشباع (S)، ترکیبات آروماتیکی (A)، رزین‌ها (R) و آسفالتین (A) [۲]. کلمه آسفالتین اولین بار توسط بوسینگالت بکار گرفته شد. بوسینگالت در بررسی آسفالت شرق فرانسه و پرو به اجزایی برخورد کرد، که در الکل نامحلول و در ترپنتین[2] محلول بودند و شباهت زیادی نیز به آسفالت داشتند، که آسفالتین نامیده شدند [۳]. آسفالتین یک سیال نفتی را، مطابق گفته نلنستین می‌توان به‌عنوان بخش غیرقابل‌حل در هیدروکربن‌های پارافینی دارای نقطه جوش پایین، اما قابل‌حل در تتراکلرید کربن و بنزن تعریف نمود. بعدها فایفر، آسفالتین را به‌عنوان بخش نامحلول در حلال‌های پارافینی سبک مثل نرمال هپتان اما محلول در حلال‌های آروماتیکی مثل تولوئن تعریف نمود [۴]. آسفالتین‌ها جامدهایی شکننده با رنگ قهوه‌ای تیره متمایل به سیاه هستند که نقطه ذوب معینی ندارند. خواص (وزن مولکولی، قطبیت و آروماتیسیته) آسفالتین رسوب شده، به طول زنجیر نرمال آلکان رسوب‌دهنده بستگی دارد [۵]. پیچیدگی‌های این جزء نفتی باعث شده تا ویژگی‌های آسفالتین از نفت‌های خام مختلف متفاوت باشد. میزان آسفالتین موجود در مخازن نفتی از ۰/۱ تا ۱۷ درصد وزنی با چگالی در حدود $kg/m^3$ ۱۲۰۰-۱۱۰۰ گزارش شده است [۶]. وزن مولکولی متعارف مونومرهای آسفالتین عموماً در محدوده بین g/mol ۵۰۰-۲۰۰۰ است و اندازه مونومرهای آسفالتین در محدوده Å ۲۴-۱۲ قرار دارد [۲]. ین با استفاده از آنالیز میکروسکوپی و مایکروسکوپی، ساختار آسفالتین را به شکل فرمول فرضی $C_{74}H_{87}NS_2O$ پیشنهاد کرد [۷]. بررسی‌ها توسط طیف‌سنجی جرمی تفکیک بالا چیزی نزدیک به ۷۲۰۰ مولکول مختلف را در ترکیب آسفالتین نشان داده‌اند [۸].

فرآیند استخراج آسفالتین با حلال به عنوان یک فناوری توسعه ای در زمینه حذف یا به حداقل رساندن تولید نفت کوره با آلودگی کاهش یافته محسوب می گردد. همچنین، استفاده از این فناوری به واسطه حذف محصولات سنگین باقیمانده تقطیری از جمله، باقیمانده برج تقطیر خلأ طی فرآیند اختلاط، ضمن به حداقل رساندن برش‌های میان تقطیری افزودنی[3] از جمله نفت سفید، منتج به تولید نفت کوره با کیفیت بالا می‌شود [۹-۱۱]. محصولات پایینی برج تقطیر در خلأ شامل محصولات با ارزشی هستند. با انجام عملیاتی بر روی این برش از برج تقطیر، جریانی از محصولات اولیه شامل آسفالت (آسفالتین، رزین‌های نرم و سخت) و نفت آسفالتین‌زدایی شده[4] (DAO)، را شامل می‌شود [۱۲]. در روش آسفالتین زدایی با حلال، حلال‌های هیدروکربنی سبک، در صورت نیاز در ابتدا متراکم شده و سپس در تماس با خوراک باقیمانده (حاوی آسفالتین) قرار می‌گیرد. فاز سبک شامل نفت آسفالتین زدایی شده و فاز سنگین‌تر که از پایین ستون قابل حصول است، شامل ترکیبات آسفالتی می‌باشد. در مرحله نهایی باید حلال مورد استفاده بازیابی گردد، ازاین‌رو هریک از جریان‌ها به‌طور جداگانه به ستون بازیابی حلال فرستاده می‌شوند [۱۲].

هدف از پژوهش حاضر، افزایش ظرفیت خوراک واحد شکست کاتالیستی بسترسیال باقیمانده‌ها[5] (RFCC) شرکت پالایش نفت شازند بوده و چنانچه بتوان خوراکی با مشخصات طراحی واحد RFCC از سایر بخش‌های پالایشگاه تولید کرد، می‌توان از میزان

1. Solvent Deasphalting
2. Turpentine
3. Cutter
4. Deasphalted Oil
5. Residual Fluid Catalytic Cracking

مصرف باقیمانده تصفیه‌شده در خوراک این واحد کاسته و از این برش جهت تولید سوخت کشتیرانی و خوراک واحدهای کک سازی استفاده کرد. ازآنجا که فرآیند استخراج مایع-مایع با استفاده از حلال‌های پارافینی کاهش قابل ملاحظه‌ای در میزان آسفالتن و فلزات بوجود می آورد، ولی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای میزان گوگرد در برش نفت آسفالتین‌زدایی شده (DAO) را کاهش نمی‌دهد، لذا انتظار می‌رود این برش بتواند به‌عنوان یک برش با گوگرد بالا در مخلوط خوراک این واحد مورد استفاده قرار گیرد. همچنین با انجام این فرآیند، امکان هم‌زمان تولید قیر با مشخصات استاندارد از باقیمانده آسفالتینی وجود خواهد داشت. در همین راستا فرآیند جداسازی استخراجی آسفالتین از باقیمانده برج تقطیر در خلأ پالایشگاه شازند، مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر فرآیند، همچون نوع حلال، مقدار حلال مصرفی و دمای استخراج و یافتن شرایط بهینه برای داشتن کمترین مقدار آسفالتین و بیشینه بازدهی، از روش طراحی آزمایش بهره گرفته شد. در پایان کیفیت نفت آسفالتین‌زدایی شده و قیر تولیدی با مشخصات استاندارد خوراک واحد RFCC و استاندارد قیر ۶۰-۷۰ به ترتیب مقایسه شد.

## مواد و روش‌ها

### مواد

ماده اولیه برای انجام آزمایش‌ها، باقیمانده سنگین حاصل از تقطیر در خلأ منطقه الف فاز یک پالایشگاه شازند است که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه‌شده است. همچنین مشخصات حلال‌های مورد استفاده در جدول ۲ بیان گردیده است.

### طراحی آزمایش

طراحی آزمایش (DoE) به سلسله آزمون‌هایی اطلاق می‌شود که عوامل مؤثر بر یک فرآیند و میزان تأثیر آن‌ها را مشخص می‌کند [۱۳]. انواع طرح آزمایش را می‌توان به دو روش فاکتوریل کامل[1] و فاکتوریل جزئی[2] تقسیم کرد. روش تاگوچی و سطح پاسخ (RSM) جزء روش‌های فاکتوریل جزئی هستند. روش سطح پاسخ (ترکیبی از تکنیک‌های ریاضی و آماری) دارای چهار مرحله: طراحی آزمایش‌ها، پردازش مدل، بررسی صحت مدل و بهینه‌سازی می‌باشد [۱۴].

**جدول ۱** مشخصات ته‌مانده برج تقطیر در خلأ پالایشگاه شازند

| مشخصات | مقدار | روش استاندارد |
|---|---|---|
| چگالی (Sp.Gr) در ۱۵/۵۶ °C ($g/cm^3$) | ۱ | ASTM D ۴۰۵۲[۲۹] |
| گرانروی در ۱۰۰ °C (cSt) | ۳۶۰ | ASTM D ۴۴۵ [۳۰] |
| آسفالتین (٪.wt) | ۶ | UOP ۶۱۴ [۳۱] |
| کربن باقیمانده[3] (CCR) (٪.wt) | ۲۰ | ASTM D ۱۸۹ [۳۲] |
| کل گوگرد (T.S) (٪.wt) | ۴ | ASTM D ۴۲۹۴ [۳۳] |
| نیکل (ppm) | ۳۵ | UOP ۸۰۰ [۳۴] |
| وانادیوم (ppm) | ۱۱۰ | UOP ۸۰۰ [۳۴] |

**جدول ۲** مشخصات حلال‌های صنعتی مصرفی

| نوع حلال | فرمول مولکولی | جرم مولی (g/mol) | چگالی ($g/cm^3$) | نقطه‌جوش (°C) | پالایشگاه تولید کننده |
|---|---|---|---|---|---|
| پنتان | $C_5H_{12}$ | ۷۲/۱۵ | ۰/۶۲۶۰ | ۳۶/۱۰ | کرمانشاه |
| هگزان | $C_6H_{14}$ | ۸۶/۱۸ | ۰/۶۵۵۰ | ۶۸/۷۳ | شازند |
| هپتان | $C_7H_{16}$ | ۱۰۰/۲۱ | ۰/۶۷۹۵ | ۹۸/۴۲ | تهران |

1. General Factorial Design
2. Fractional Factorial Design
3. Conradson Carbon Residue

مدل درجه ۲ برای فرآیندهای صنعتی مناسب است و دارای نقاط قوتی همچون انعطاف‌پذیری بسیار بالا، عملکرد مناسب در تقریب صحیح از پاسخ و سهولت در تخمین زدن عامل‌های β می‌باشد [۱۵]. با توجه به مزیت‌های مدل درجه ۲ و همچنین عملیاتی بودن اطلاعات، از این نوع مدل برای بررسی تأثیر متغیرهای ورودی بر متغیرهای خروجی در فرآیند استخراج استفاده شد. در واقع از آنجایی‌که شرایط عملیاتی ممکن است با تغییرات غیراصولی همراه باشد مدل درجه ۲ غیرخطی قابلیت توصیف آن را دارد. مدل چندجمله‌ای درجه ۲ را می‌توان به شکل رابطه زیر در نظر گرفت [۱۶]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \in \quad (1)$$

در این معادله Y پاسخ، $x_i$ و $x_j$ متغیرهای مستقل، $\beta_0$ عدد ثابت و $\beta_{ii}$، $\beta_i$ و $\beta_{ij}$ به ترتیب ضرایب جملات خطی، درجه ۲ و برهم‌کنش دوتایی هستند. ∈ هم به‌عنوان خطا در نظر گرفته می‌شود. سه طرح کاربردی مرکب مرکزی (CCD)، باکس بنکن (BBD) و دهلرت در برازش مدل مرتبه دوم در روش سطح پاسخ به کار می‌رود. هر سه روش فوق بر پایه ترکیبی از طرح‌های فاکتوریل کامل و فاکتوریل جزئی ساخته شده‌اند [۱۷].

در این مطالعه برای طراحی، مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی از نرم‌افزار طراحی آزمایش Design-Expert software (version 13.0.1.0, Stat-Ease Inc., USA) بهره گرفتیم [۱۸]. متغیرهای مستقل عبارتند از: نوع حلال ($X_1$)، نسبت حلال به خوراک ($X_2$) و دمای استخراج ($X_3$). درصد وزنی آسفالتین در نمونه آسفالتین‌زدایی شده (Y) به‌عنوان پارامتر وابسته (پاسخ) در نظر گرفته شد و عملکرد فرآیند استخراج به‌وسیله آنالیز آن ارزیابی شد. در این بین فشار استخراج (فشار اتمسفری) و سرعت هم زدن محلول، به جهت عدم امکان تغییر فشار در شرایط آزمایشگاهی و دیگری به دلیل تأثیرگذاری کمتر ثابت نگه‌داشته شدند. سه متغیر وابسته به پارامترهای بی‌بعد تبدیل شدند. سطوح پایین، مرکز و بالای هریک از متغیرها بر اساس طراحی مرکب مرکزی از روش‌های طراحی سطح-پاسخ، به ترتیب مقادیر ۱-، ۰ و ۱+ تعریف شدند.

برای محاسبات آماری، متغیرهای مستقل انتخاب‌شده به کدهای بی‌بعد تبدیل شدند، که این حالت امکان مقایسه پارامترهای مختلف با ابعاد متفاوت را به ما می‌دهد و سبب کاهش خطا در مدل چندجمله‌ای می‌شود. جدول ۳ متغیرهای وابسته و کدهای استفاده‌شده آن‌ها در طراحی مرکب مرکزی را نشان می‌دهد. تعداد آزمایش‌ها (N) برای طراحی مرکب مرکزی از رابطه $N=2^k+2k+C0$ محاسبه می‌شود که در آن k تعداد فاکتورها و $C_0$ تعداد نقاط مرکزی است که معمولاً ۳ در نظر گرفته می‌شود [۱۹]. بر اساس آنالیز آماری توسط نرم‌افزار، آزمایش‌ها بایستی در ۸ نقطه فاکتوریل ($2^k$)، ۶ نقطه محوری (2k) و ۳ نقطه مرکزی (C) و درمجموع ۱۷ نقطه انجام گیرد (جدول ۴).

**شرح آزمایش**

مقدار g ۲۰ از نمونه (باقیمانده برج تقطیر در خلأ) را با نسبت‌های مختلف (۵-۱۵ mL/g) از حلال ($C_5$-$C_7$) به یک بشر با حجم ۵۰۰ mL اضافه می‌کنیم و سپس به مدت یک ساعت نمونه‌ها را به‌منظور یکنواخت شدن بر روی همزن مغناطیسی در فشار اتمسفر و دماهای متفاوت (۱۵-۳۵ °C) قرار می‌دهیم.

**جدول ۳** متغیرهای مستقل و مقادیر کد آن‌ها در طراحی مرکب مرکزی

| نماد | پارامتر | واحد | مقادیر کد شده | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | ۱- | ۰ | ۱+ |
| $X_1$ | نوع حلال | - | $C_5$ | $C_6$ | $C_7$ |
| X2 | نسبت حلال به خوراک | mL/g | ۵ | ۱۰ | ۱۵ |
| X3 | دمای استخراج | °C | ۱۵ | ۲۵ | ۳۵ |

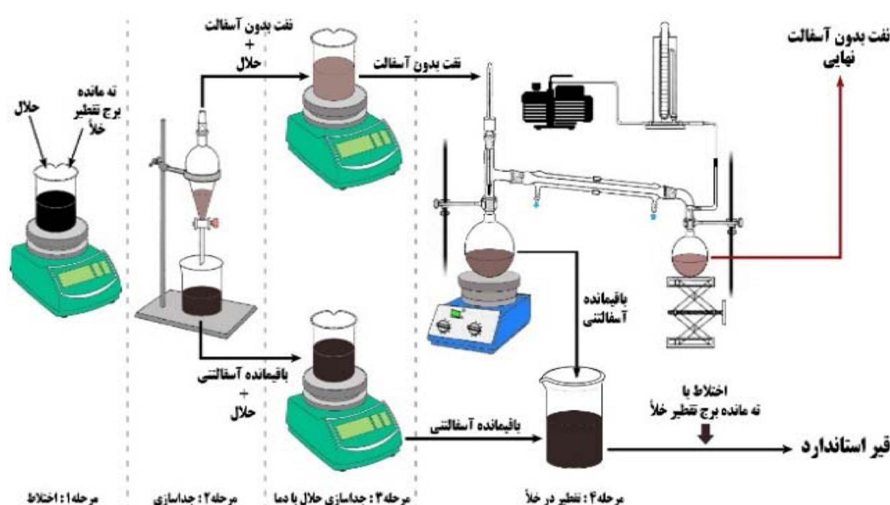
**جدول ۴** طراحی ماتریکس آزمایشگاهی جهت بهینه‌سازی

| استاندارد | آزمایش | نوع | پارامترهای مستقل | | | پاسخ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | نوع حلال | نسبت حلال به خوراک | دمای استخراج | درصد وزنی آسفالتین باقیمانده |
| ۱ | ۷ | فاکتوریل | $C_5$ | ۵ | ۱۵ | ۱/۱۰ |
| ۲ | ۲ | | $C_7$ | ۵ | ۱۵ | ۱/۷۹ |
| ۳ | ۹ | | $C_5$ | ۱۵ | ۱۵ | ۱/۲۲ |
| ۴ | ۱۷ | | $C_7$ | ۱۵ | ۱۵ | ۱/۹۶ |
| ۵ | ۱۲ | | $C_5$ | ۵ | ۳۵ | ۰/۷۶ |
| ۶ | ۸ | | $C_7$ | ۵ | ۳۵ | ۱/۱۵ |
| ۷ | ۱۳ | | $C_5$ | ۱۵ | ۳۵ | ۰/۱۶ |
| ۸ | ۱۵ | | $C_7$ | ۱۵ | ۳۵ | ۰/۴۰ |
| ۹ | ۱۴ | محوری | $C_5$ | ۱۰ | ۲۵ | ۰/۲۱ |
| ۱۰ | ۶ | | $C_7$ | ۱۰ | ۲۵ | ۰/۵۲ |
| ۱۱ | ۱ | | $C_6$ | ۵ | ۲۵ | ۱/۳۱ |
| ۱۲ | ۳ | | $C_6$ | ۱۵ | ۲۵ | ۰/۵۳ |
| ۱۳ | ۵ | | $C_6$ | ۱۰ | ۱۵ | ۰/۹۵ |
| ۱۴ | ۴ | | $C_6$ | ۱۰ | ۳۵ | ۰/۲۹ |
| ۱۵ | ۱۰ | مرکزی | $C_6$ | ۱۰ | ۲۵ | ۰/۳۹ |
| ۱۶ | ۱۶ | | $C_6$ | ۱۰ | ۲۵ | ۰/۳۹ |
| ۱۷ | ۱۱ | | $C_6$ | ۱۰ | ۲۵ | ۰/۳۹ |

سپس محلول را درون قیف جداکننده ریخته که بعد از گذشت یک ساعت دو فاز حلال-روغن (DAO) و حلال-آسفالتین (Pitch) به وجود می‌آیند که براساس اختلاف چگالی از هم جدا می‌شوند. سپس جداسازی حلال از هر دو فاز با افزایش دما انجام می‌گیرد. در مرحله بعد بر روی نفت آسفالتین زدایی شده جداسازی با تقطیر در خلأ انجام داده تا به نفت آسفالتین زدایی شده نهایی دست یابیم. در آخر به ترکیب باقیمانده آسفالتنی به دست آمده از قیف جداکننده و تقطیر در خلأ، ته مانده برج تقطیر اضافه کرده تا قیر استاندارد حاصل شود. در شکل ۱ نمایی از آزمایش نمایش داده‌شده است.

**آنالیز نمونه‌ها**

برای اندازه‌گیری مقدار آسفالتین موجود در نمونه از روش استاندارد UOP ۶۱۴ استفاده شد [۲۰]. مقدار ۱ g از نمونه خوراک را وزن کرده و در داخل ارلن مایر ریخته و به آن ۲۵۰ mL حلال اضافه می‌کنیم و آن را به مدت ۵۰-۳۰ s با همزن مکانیکی هم زده تا مخلوط کاملاً یکنواخت گردد. سپس محتویات ارلن را روی حمام آب گرم که دمای آن در ۸۰ °C تنظیم‌شده قرار می‌دهیم و با یک شیب ملایمی دمای محتویات ظرف را تا نزدیک نقطه‌جوش حلال افزایش می‌دهیم، به‌طوری‌که به مدت ۳ h در این دما ثابت نگه داشته شود. بعد از گذشت مدت‌زمانی کوتاه، رسوبات تشکیل‌شده آسفالتن مشاهده می‌گردد. سپس محلول به‌دست‌آمده از فیلتری با قطر ۳۵ mm (با قطر روزنه‌های ۵ µm) عبور داده می‌شود. رسوب تشکیل‌شده روی کاغذ صافی را با حلال تمیز شستشو داده تا در صورت باقی ماندن هیدروکربن‌های اشباع سنگین در خلل و فرج رسوب، شسته شده و از کاغذ صافی عبور کنند. درنهایت رسوب را در جای تمیز و خشک قرار داده تا رطوبت آن از بین برود.




**شکل ۱** دیاگرام شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی استخراج آسفالتین

وزن آسفالتین با کم کردن وزن ظرف و فیلتر از مجموع وزن ظرف، فیلتر و آسفالتین ته‌نشین شده به دست می‌آید. درصد وزنی آسفالتین توسط رابطه زیر محاسبه شده است:

$$wt.\% = \frac{w_g - w_t}{w_s} \times 100 \qquad (۲)$$

که در آن $w_g$، $w_t$ و ws به ترتیب وزن ظرف+نمونه+فیلتر، وزن ظرف+فیلتر و وزن نمونه می‌باشند.

برای تعیین میزان باقیمانده کربنی کنرادسون، ترکیبات گوگردی و فلزات نیکل و وانادیوم به ترتیب از دستگاه‌های (NORMALAB, model NMC 210, method ASTM D 189)، (X-Ray Fluorescence Sulfur Analyzer, model 87-1152, method ASTM D 4294) (XRF Spectroscopy, model PANalytical-Epsilon 3, method UOP 800) استفاده شده است.

برای اندازه‌گیری چگالی، درجه نفوذ، نقطه نرم‌شدن، کشش‌پذیری، اتلاف به دلیل حرارت کاهش نفوذ پس از حرارت‌دهی، نقطه اشتعال، حلالیت در کربن دی سولفید و تست لکه[1] به ترتیب از روش‌های [۲۱] ASTM D 71، [۲۲] ASTM D 5، [۲۳] ASTM D 36، [۲۴] ASTM D 113، [۲۵] ASTM D 6، [۲۵] ASTM D 6، [۲۶] ASTM D 4، ASTM D 92 و A.A.S.H.O.T[2] 102 استفاده شد.

## نتایج و بحث

### آنالیز طراحی آزمایش

در ابتدا به تحلیل داده‌های مدلسازی می پردازیم. یک مدل چندجمله‌ای درجه دوم بر اساس روش حداقل مربعات[3] به‌منظور پیش‌بینی پاسخ سیستم و تخمین ضرایب، از طریق همبستگی برهم‌کنش‌ها میان متغیرهای فرآیندی و پاسخ، مورد استفاده قرار گرفت. معادله (۳) (خروجی نرم‌افزار طراحی آزمایش)، مدل طراحی مرکب مرکزی برای درصد وزنی آسفالتین محصول نفت آسفالتین زدایی شده مرحله استخراج را ارائه می‌دهد:

$$Y = +0.3712 + 0.0318X_1 - 0.2183X_2 - 0.4100X_3 - 0.1717X_1X_2 + 0.0800X_1X_3 - 0.2050X_2X_3 + 0.5073X_2^2 + 0.2073X_3^2 \qquad (۳)$$

در این معادله $X_1$، $X_2$، $X_3$ و Y به ترتیب نوع حلال، نسبت حلال به خوراک، دمای استخراج و درصد وزنی آسفالتین هستند. ضرایب معادله (۳) نشان می‌دهند که متغیر مستقل دمای استخراج و برهم‌کنش مرتبه ۲ نسبت حلال به خوراک تأثیر بیشتری بر روی درصد وزنی آسفالتین دارند. نتایج تحلیل واریانس مدل درجه دوم درصد وزنی آسفالتین در جدول ۵ ارائه گردیده است.

1. Spot Test
2. American Association of State Highway Officials
3. Least-Squares Method

**جدول ۵** آنالیز واریانس برای پاسخ سطح‌ترم های مدل چند جمله‌ای مرتبه ۲

| منبع | | مقدار F | مقدار P |
|---|---|---|---|
| مدل | | ۹۵/۳۴ | <۰/۰۰۰۱ |
| خطی | $X_1$ | ۶۱/۹۱ | ۰/۰۰۰۳ |
| | $X_2$ | ۷۳/۸۳ | ۰/۰۰۰۴ |
| | $X_3$ | ۳۹۵/۷۶ | <۰/۰۰۰۱ |
| برهم کنش | $X_1X_2$ | ۱۱/۷۰ | ۰/۰۱۳۰ |
| | $X_1X_3$ | ۱۱/۲۴ | ۰/۰۱۴۱ |
| | $X_2X_3$ | ۷۳/۳۲ | ۰/۰۰۰۴ |
| درجه ۲ | $X_2^2$ | ۱۵۰/۳۸ | ۰/۰۰۰۱ |
| | $X_3^2$ | ۲۵/۱۱ | ۰/۰۰۴۱ |
| باقیمانده[۱] | ۰/۰۰۴۶ | عدم برازش[۲] | ۰/۰۰۷۶ |
| خطای خالص[۳] | ۰/۰۰۰۰ | کل اصلاحیه[۴] | ۴/۸۳ |
| انحراف معیار | ۰/۰۶۷۷ | $R^۲$ | ۰/۹۹۵۳ |
| میانگین | ۰/۷۹۵۳ | $R^۲$ تطبیقی[۵] | ۰/۹۸۴۸ |
| ضریب واریانس | ۸/۵۱ | $R^۲$ پیش بینی شده[۶] | ۰/۹۰۴۷ |
| باقیمانده مجموع مربعات[۷] | ۰/۴۶۰۵ | دقت کافی | ۳۱/۶۱۴۵ |

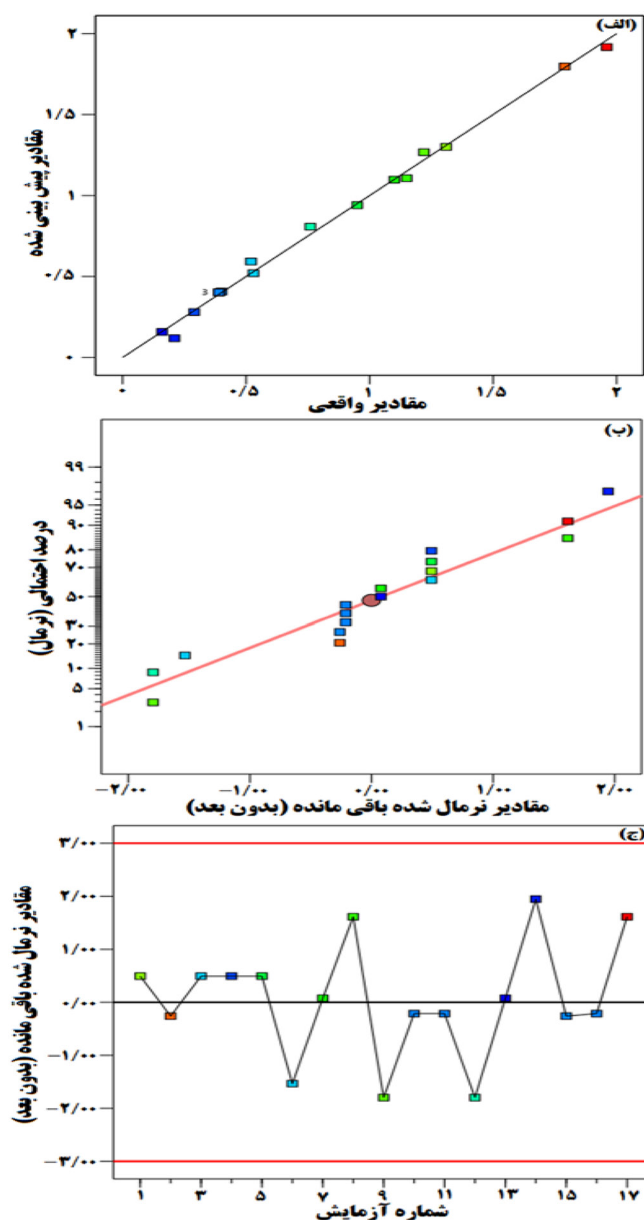
مقادیـــر F و P بـــه ترتیـــب ۹۵/۳۴ و ۰/۰۰۰۱> گـــزارش گردیـد کـه نشـان‌دهنده معنـادار بـودن مـدل تطبیقـی می‌باشـد. مقـدار بـالای F نشـانگر آن اسـت کـه بیشـترین تغییـرات پاسـخ را می‌تـوان بـا مـدل رگرسـیون شـرح داد [۲۷]. در ایـن مـدل جمله‌هایـی کـه مقـدار P آن‌هـا کوچک‌تـر از ۰/۰۵ اسـت، در مـدل رگرسـیون اهمیـت بیشـتری دارنـد و در مقابل جملاتـی کـه مقدار P آن ها بیشـتر از ۰/۱۰۰۰ باشـد، پارامترهـای بی‌اهمیتـی در مـدل هسـتند [۱۵]. بـا توجـه بـه جـدول ۵ تمامـی جمله‌هـای خطـی، درجـه دوم و برهم‌کنـش دارای چنیـن شـرایطی هسـتند. از طرفـی دمـای اسـتخراج و برهم‌کنـش درجـه دوم نسـبت حـلال بـه خـوراک دارای ۰/۰۰۰۱> P هسـتند کـه گویـای آن اسـت کـه ایـن پارامترهـا بـرای مـدل درصـد وزنـی آسـفالتین دارای اهمیـت بیشـتری هسـتند.

کیفیـت بـرازش مـدل توسـط ضرایـب همگرایـی $R^2$ و $R^2_{adj}$ تعییـن می‌گـردد کـه بـه ترتیـب نشـان‌دهنده میـزان نوسـان در مقـدار پاسـخ و کسـری از نوسـانات پاسـخ اسـت کـه توسـط مـدل تفسـیر می‌شـوند. $R^2$ و $R^2_{adj}$ بـرای مـدل بـه ترتیـب ۰/۹۹۵۳ و ۰/۹۸۴۸ بـه دسـت آمـد و همچنیـن مقـدار $R^2_{Pred}$ (۰/۹۰۴۷) بـه $R^2_{adj}$ نزدیـک اسـت. بنابرایـن، مقـدار $R^2$ بـرای معادلـه (۳) بـه ۱ نزدیـک بـوده کـه نشـان‌دهنده تطابـق نتایـج مـدل بـا مقادیـر تجربـی می‌باشـد [۲۸]. دقـت کافـی[۷] (AP) نسـبت سـیگنال بـه نویـز را اندازه‌گیـری می‌کنـد کـه نسـبت ۳۱/۶۱۴۵ (بزرگ‌تـر از ۴) نشـانگر یـک سـیگنال مناسـب اسـت. بنابرایـن، ایـن مـدل می‌توانـد به‌عنـوان هدایت‌گـر فضـای طراحـی مـورد اسـتفاده قـرار گیـرد. انحـراف معیـار[۸] (Std. Dev) اختـلاف میـان داده‌هـای پیش‌بینی‌شـده و تجربـی را نشـان می‌دهـد. مقـدار پائیـن آن (۰/۰۶۷۷) به‌طـور معمـول بـرای یـک مـدل مناسـب می‌باشـد. ضریـب واریانـس[۹] (C.V.٪) به‌عنـوان

1. Residual
2. Lack of Fit
3. Pure Error
4. Cor Total
4. Adjusted
5. Predicted
6. Predicted Residual Sum of Squares
7. Adequate Precision
8. Standard Deviation
9. Coefficient of Variance

نسبت خطای استاندارد داده‌های تخمینی به میانگین مقدار پاسخ مشاهده شده تعریف می‌شود که معیاری از تکرارپذیری مدل است. مقدار آن برای یک مدل مناسب بایستی کمتر از ۱۰ (۸/۵۱) باشد [۲۹].

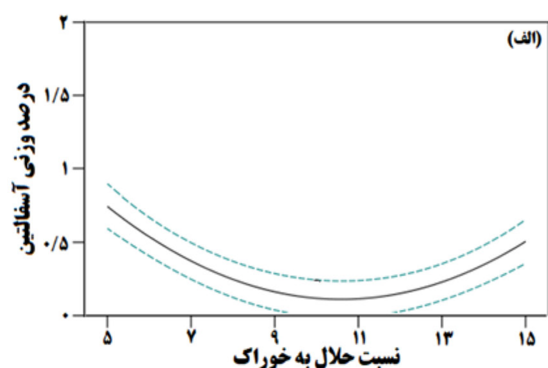
منحنی مقادیر احتمال نرمال باقیمانده و داده‌های پیش‌بینی‌شده در شکل ۲ نشان داده شده است. شکل ۲ نشان می‌دهد که تطابق خوبی میان داده‌های واقعی و مدل وجود دارد (شکل ۲ (الف)). بنابر شکل ۲ (ب) داده‌های مشاهده شده دارای توزیع نرمال هستند و الگوی خط راست y=x وجود دارد. بنابراین، مدل چندجمله‌ای درجه دوم برای پیش‌بینی مقادیر درصد وزنی آسفالتین محصول نفت آسفالتین زدایی شده استخراج مناسب می‌باشد [۳۰]. همچنین از شکل ۲ (ج) مشاهده می‌شود که مقادیر خطا برای همه آزمایش‌ها به‌صورت تصادفی بوده است یا به عبارت دیگر، تولید خطای یکسان در آزمایش‌ها مشاهده نمی‌شود [۳۱].

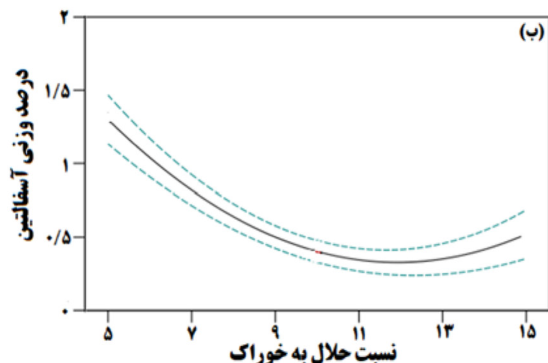


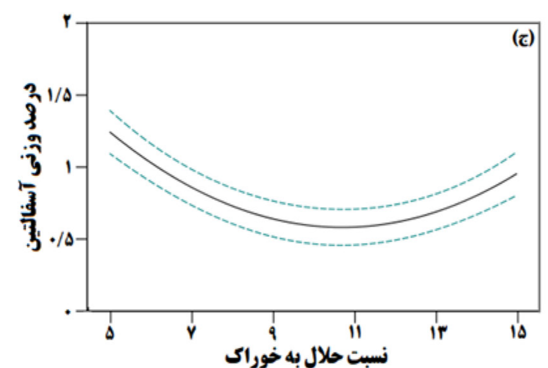

**شکل ۲** (الف) مقادیر واقعی در برابر مقادیر پیش بینی شده، (ب) نمودار احتمال نرمال و (ج) نمودار مقادیر خطا در هر آزمایش

**تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی عملکرد فرآیند استخراج**

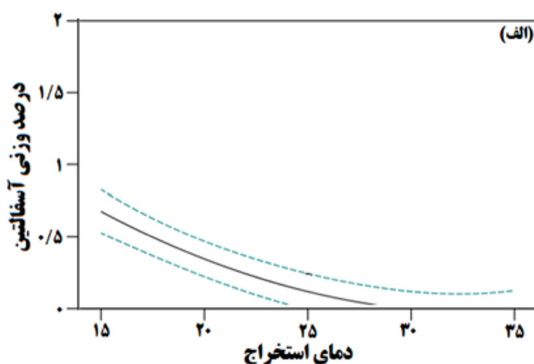
زمانی که باقیمانده‌های سنگین، تحت فرآیند استخراج با حلال قرار می‌گیرد، برخی خواص آن در جهت مطلوب کاهش و برخی دیگر افزایش می‌یابد که میزان کاهش یا افزایش بستگی به شرایط استخراج خواهد داشت. از منحنی‌های دو بعدی (تک فاکتور) برای توصیف گرافیکی تأثیر متغیرهای مستقل آزمایشگاهی بر روی درصد وزنی آسفالتین محصول استخراج شده استفاده گردید. منحنی‌های سطح پاسخ از معادله (۳) به دست آمدند که در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ به تصویر کشیده شده‌اند. این شکل‌ها تأثیر متغیرهای فرآیندی همچون نوع حلال، نسبت حلال به خوراک و دمای استخراج بر روی درصد وزنی آسفالتین محصول استخراج را نشان می‌دهند.

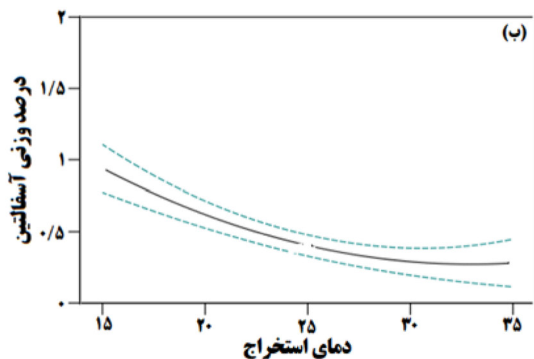


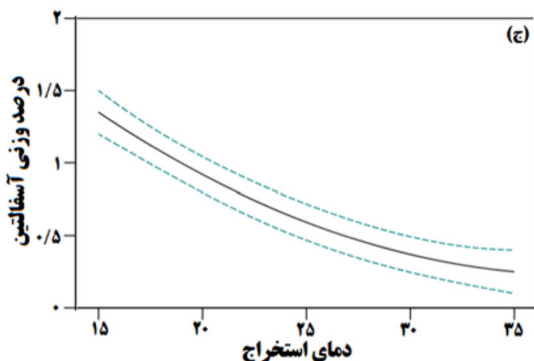



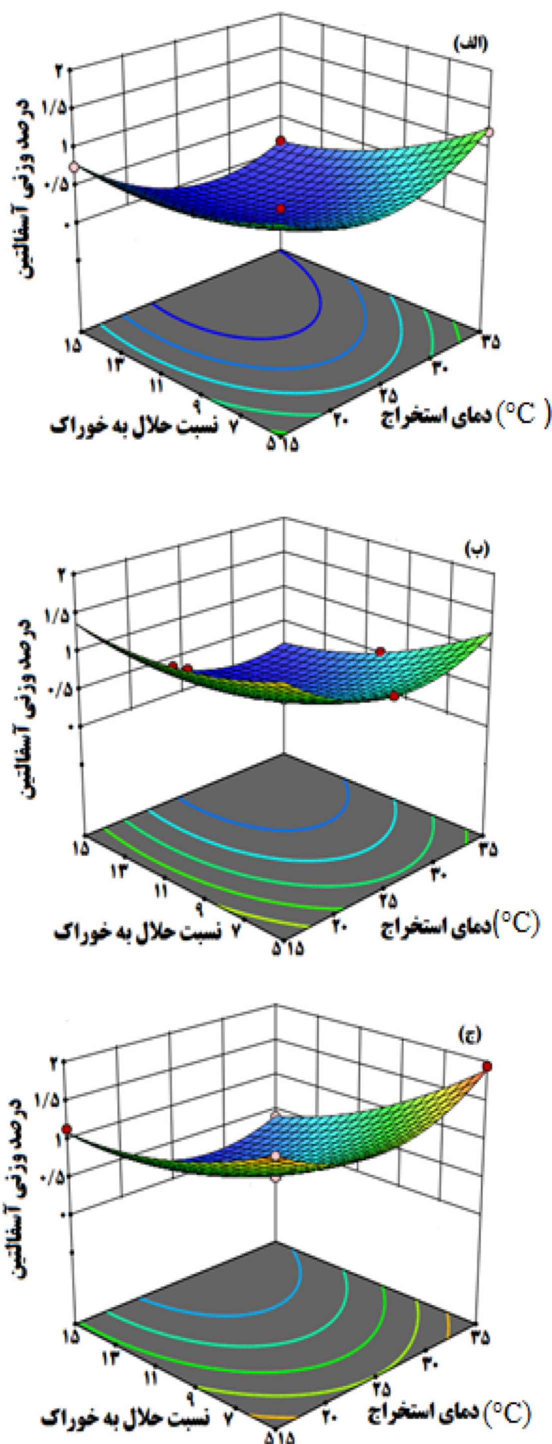

**شکل ۳** تأثیر نسبت حلال به خوراک بر روی درصد وزنی آسفالتین (الف) پنتان، (ب) هگزان و (ج) هپتان




**شکل ۴** تأثیر دما بر روی درصد وزنی آسفالتین باقیمانده برای حلال (الف) پنتان، (ب) هگزان و (ج) هپتان




**شکل ۵** تأثیر برهم‌کنش متغیرها بر روی درصد وزنی آسفالتین باقیمانده برای حلال (الف) پنتان، (ب) هگزان و (ج) هپتان

### تأثیر نسبت حلال به خوراک بر روی درصد وزنی آسفالتین در نفت آسفالتین‌زدایی شده

انتخاب‌پذیری عمل آسفالتین زدایی به‌طور قابل‌توجهی می‌تواند با افزایش نسبت حلال بهبود یابد، این متغیر اصلی طراحی است که کیفیت روغن استخراج‌شده را بهبود می‌بخشد. در دمای ثابت با افزایش نسبت حلال به خوراک، میزان روغن استخراج‌شده، گرانروی روغن، میزان کربن باقیمانده، فلزات، گوگرد و نیتروژن روغن استحصالی افزایش می‌یابد و در عوض شاخص گرانروی و دانسیته API کاهش می‌یابد [۳۲]. در رسوب آسفالتین، افزایش نسبت حلال به خوراک موجب انحلال رزین های بیشتر و همچنین افزایش درصد رسوب آسفالتین می گردد. افزایش نسبت حلال به خوراک، باعث برهم خوردن تعادل میان ترکیبات خوراک و انحلال بیشتر رزین‌ها در حلال می شود. زیرا با افزایش نسبت حلال، نیروی جاذبه میان حلال و رزین به حدی قوی می‌گردد که تعادل جزئی میان آسفالتین و رزین برهم خورده و ذرات آسفالتین آزاد می‌گردد. همین اتفاق را می‌توان با پارامتر حلالیت نیز توجیه کرد زیرا پارامتر حلالیت رزین به حلال نزدیک‌تر بوده و با افزایش میزان حلال، رزین‌های بیشتری از آسفالتین جدا می‌شود و در کل موجب افزایش درصد رسوب آسفالتین می‌گردد [۳۳].

با افزایش نسبت حلال، درصد وزنی آسفالتین تا یک مقدار، مطابق با مرحله تەنشینی کاهش می‌یابد، سپس افزایش می‌یابد (شکل ۳). شکل ۳ نشان می‌دهد که افزایش نسبت حلال به خوراک تا نقطه بهینه تأثیر مثبتی بر روی فرآیند می‌گذارد به‌طوری‌که با افزایش این نسبت از ۵ mL/g تا ۱۰ mL/g درصد وزنی آسفالتین در مورد حلال‌های پنتان، هگزان و هپتان در دمای ۲۵ °C به ترتیب از ۰/۷۴۶، ۱/۳۰۰ و ۱/۲۴۵ تا ۰/۱۱۸، ۰/۴۰۳ و ۰/۵۹۲ کاهش یافته و این مقادیر در نسبت ۱۵ mL/g به ترتیب به ۰/۵۰۶، ۰/۵۲۰ و ۰/۹۵۵ رسیدند. تحقیقات انجام شده شاهد همین مدعاست که با افزایش نسبت حلال به خوراک، پارامتر حلالیت کاهش و میزان رسوب آسفالتین افزایش یافته و در نتیجه مقدار آسفالتین موجود در نفت آسفالتین‌زدایی شده کاهش می‌یابد [۳۴ و ۳۵].

**تأثیر دما بر روی درصد وزنی آسفالتین باقیمانده در نفت آسفالتین‌زدایی شده**

اثر دمای عملیات بر روی انتخاب‌پذیری استخراج، باعث تغییر توان حلال می‌شود. اگرچه تأثیر نوع خوراک‌ها و حلال‌ها ممکن است قابل‌توجه باشد اما دمای عملیاتی بالاتر منجر به کاهش کشش سطحی حلال و قدرت حلالیت آن می‌شود. برای حلال و خوراک داده‌شده با افزایش دمای عملیاتی، آسفالت نرم‌تر و بیشتر و بازده روغن آسفالت‌گیری شده کمتر خواهد شد. هنگامی‌که به حد فوق بحرانی می‌رسیم ممکن است ته‌نشینی کامل روغن صورت گیرد. درنتیجه، شرایط بحرانی حداکثر دمای عملیاتی ممکن را برای یک سیال داده‌شده فراهم می‌کند. بهینه کردن انتخاب‌پذیری استخراج به معنی در نظر گرفتن گرادیان دما است. درصورتی‌که نسبت حلال به خوراک ثابت باشد، با افزایش دما، میزان روغن استخراج‌شده، گرانروی، کربن باقیمانده، فلزات، گوگرد و نیتروژن کاهش و دانسیته API و شاخص گرانروی افزایش می‌یابد [۳۶]. با افزایش دمای استخراج، بازده نفت آسفالتین‌زدایی شده به مقدار کمی کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش دمای استخراج، انتخاب‌پذیری افزایش می‌یابد، درنتیجه ناخالصی نفت بدون آسفالتین نیز کاهش می‌یابد. علت تغییرات بسیار ناچیز نفت آسفالتین‌زدایی شده با دما این است که آلکان‌ها و هیدروکربن‌های اشباع‌شده تقریباً مستقل از دما هستند درنتیجه ضرایب اکتیویته آن‌ها نیز تقریباً مستقل از دماست. همچنین داده‌های تجربی برای ضرایب اکتیویته این‌گونه مخلوط‌ها وجود دارد که تغییرات بسیار ناچیزی را با دما نشان می‌دهد و این خود نتیجه وابستگی بسیار کم ضرایب برهم کنش دوتایی هیدروکربن‌ها به دماست. اما حلالیت اجزاء سنگین‌تر مثل آسفالتین‌ها تا حدودی به دما وابسته است و این وابستگی نسبت عکس دارد [۳۷]. به‌طورکلی فاکتورهایی که باعث افزایش دانسیته حلال شوند، ظرفیت حلال را برای حل کردن روغن افزایش می‌دهند، این ظرفیت عموماً به حلالیت برمی‌گردد. درنتیجه کاهش دما منجر به افزایش دانسیته حلال شده و این خود باعث افزایش بازده روغن آسفالت‌گیری شده می‌شود. روابط دما-حلالیت برای برش‌های سنگین نفت در حلال‌های پارافینی سبک برخلاف انتظار عکس هم می‌باشد. چنانچه خلوص نفت آسفالتین‌زدایی شده مدنظر باشد می‌توان با افزایش دما خلوص آن را افزایش داد اما باید توجه داشت که افزایش دما، کاهش نفت آسفالتین زدایی شده را نیز به همراه دارد. برای جبران کاهش نفت آسفالتین‌زدایی شده می‌توان نسبت حلال به خوراک را افزایش داد. نتیجه کلی این است که انتخاب‌پذیری بسیار خوبی ایجاد شده و جداسازی بین نفت آسفالتین زدایی شده و آسفالت تقویت می‌شود [۳۸].

بنابر شکل ۴ افزایش دمای استخراج در محدوده مطالعاتی تأثیر مثبتی بر روی فرآیند می‌گذارد به‌طوری‌که با افزایش دمای استخراج از °C ۱۵ تا °C ۲۵ درصد وزنی آسفالتین در خصوص حلال‌های پنتان، هگزان و هپتان در نسبت حلال به خوراک ۱۰ mL/g به ترتیب از ۰/۶۷۶، ۰/۹۴۰ و ۱/۳۵۰ تا ۰/۱۱۸، ۰/۴۰۳ و ۰/۵۹۲ mL/g کاهش یافته، درحالی‌که با افزایش بیشتر دمای استخراج از دمای محیط تا °C ۳۵ روند نامحسوس کاهشی به ترتیب تا ۰/۰۲۴، ۰/۲۸۰ و ۰/۲۵۰ °C ادامه می‌یابد. در گزارش‌های موجود نیز مشاهده می‌شود که با افزایش دما درصد رسوب آسفالتین افزایش می‌یابد. یا به عبارتی، میزان آسفالتین موجود در نفت آسفالتین‌زدایی شده کاهش یافته که این حداقل میزان آسفالتین با افزایش تعداد کربن از حلال نرمال پنتان تا نرمال هپتان افزایش می‌یابد [۳۹].

**تأثیر برهم‌کنش متغیرها بر روی درصد وزنی آسفالتین باقیمانده در نفت آسفالتین‌زدایی شده**

رفتار برهم‌کنشی متغیرهای مستقل و اثر هم‌زمان آن‌ها بر روی میزان درصد وزنی آسفالتین، در

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۲۸-۱۲۹

قالب نمودارهای سه‌بعدی (شکل ۵) نشان داده‌شده است. منحنی‌های سطح پاسخ از معادله (۳) به دست آمدند که در شکل ۵ به تصویر کشیده شده‌اند. در نمودارهای سه‌بعدی میزان انحنای سطح به‌عنوان معیاری برای تعیین شدت برهم‌کنش بین دو متغیر در نظر گرفته می‌شود. انحنای بیشتر یک سطح، نشان‌دهنده برهم‌کنش شدیدتر بین دو متغیر خواهد بود. منحنی‌های سه‌بعدی نشان‌دهنده یک برهم‌کنش قوی بین دمای استخراج و نسبت حلال به خوراک (P =۰/۰۰۰۴) هستند.

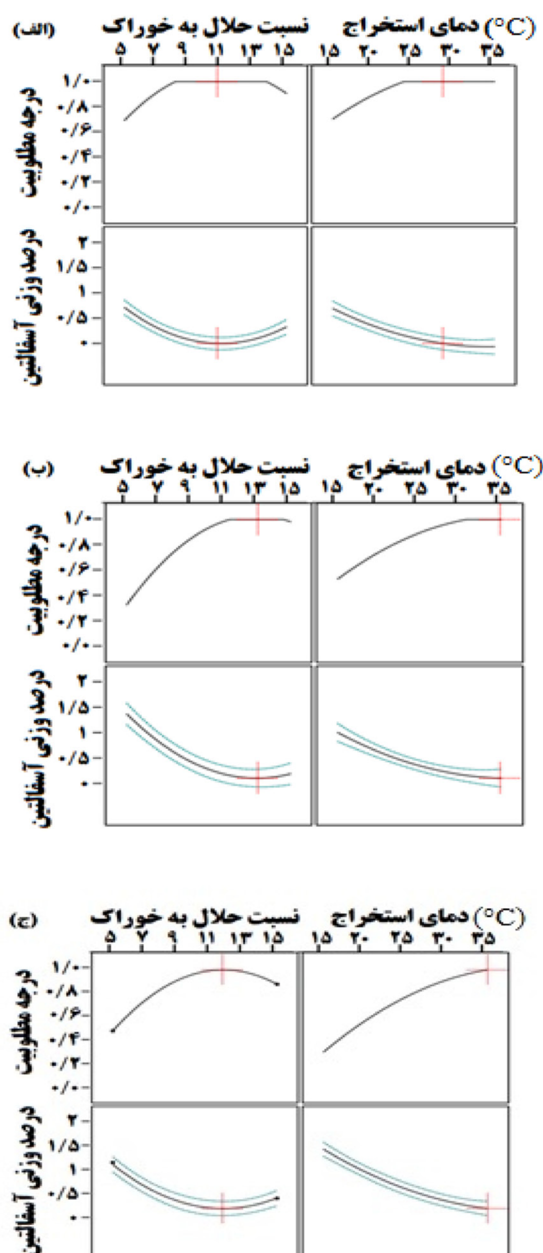
**بهینه‌سازی و اعتبار سنجی آزمایشات**

نرم‌افزار طراحی آزمایش می‌تواند شرایط بهینه پارامترها برای رسیدن به کمترین میزان درصد وزنی آسفالتین در محصول نفت آسفالتین‌زدایی شده به عنوان تابع هدف را، تعیین کند. بدین‌صورت که تمامی متغیرها در حالت بین محدوده عملیاتی و مقدار پاسخ در حالت کمینه قرار داده‌شده‌اند و درصد وزنی آسفالتین محصول استخراج، با درجه مطلوبیت ۱ به دست می‌آید [۴۰]. درصد وزنی آسفالتین بهینه‌شده آماری برای حلال‌های نرمال پنتان، هگزان و هپتان به ترتیب ۰/۰۰۲، ۰/۱۰۷ و ۰/۱۸۹ در نسبت حلال به خوراک ۱۰/۷، ۱۳ و ۱۱/۶ ml/g و دمای استخراج ۲۸/۵، ۳۴/۸ و ۳۵ °C به دست آمد (شکل ۶). به‌منظور تایید درستی مدل پیش‌بینی‌شده، یک آزمایش دیگر در شرایط بهینه پیشنهادی توسط نرم‌افزار انجام شد و درصد وزنی آسفالتین بهینه آزمایشگاهی در شرایط مشابه عملیاتی به ترتیب ۰/۰۰۲۴، ۰/۱ و ۰/۲۱ حاصل شد که با خطای ۱۶٪، ۷٪ و ۱۰٪ تطابق خوبی میان داده آزمایشگاهی و مدل آماری وجود دارد.

همان‌طور که از شکل ۶ مشاهده می‌شود مقدار آسفالتین موجود در نفت آسفالتین‌زدایی شده استخراج‌شده توسط نرمال پنتان از بقیه کمتر است. مشاهدات نشان می‌دهد که هرچقدر تعداد اتم‌های کربن نرمال آلکان‌ها بیشتر باشد نقطه‌جوش آن‌ها افزایش‌یافته و باعث حل شدن بیشتر آسفالتین در خود شده و درنتیجه رسوب آسفالتین کمتری تشکیل می‌شود. به‌طورکلی هرچه حلال سبک‌تر باشد میزان آسفالتین جداشده افزایش می‌یابد. مطالعات صورت گرفته نیز این نتیجه به‌دست آمده را تایید می‌کنند که با افزایش تعداد کربن‌های نرمال آلکان و یا در واقع افزایش وزن مولکولی آن‌ها، درصد رسوب آسفالتین کاهش یافته و مقدار آسفالتین موجود در نفت آسفالتین‌زدایی شده افزایش می‌یابد [۴۱-۴۴]. در شرایط بهینه اقتصادی که شامل در نظر گرفتن صرفه‌جویی در مواد شیمیایی (کمینه مقدار نسبت حلال به خوراک)، حداقل مصرف انرژی (نزدیکترین دما به محیط) و همچنین تأمین کردن شرط حداقل میزان درصد وزنی آسفالتین در نفت آسفالتین‌زدایی شده با توجه به استاندارد خوراک ورودی به واحد RFCC (<۰/۵) می‌باشد؛ درصد وزنی آسفالتین برای حلال‌های نرمال پنتان، هگزان و هپتان به ترتیب ۰/۴۵۱، ۰/۴۴۷ و ۰/۵۸۴ در نسبت حلال به خوراک ۶/۵، ۹/۵ و ۱۱ mL/g و دمای استخراج ۲۵ °C (دمای محیط) به دست آمد. از آنجا که حلال نرمال هگزان از محصولات پالایشگاه شازند است ادامه تحقیق با این حلال پیش برده شده است.

**تأمین الزامات مشخصات خوراک ورودی به واحد شکست کاتالیستی باقیمانده‌ها و تولید قیر با استاندارد ۶۰-۷۰**

مقدار درصد وزنی آسفالتین در نفت آسفالتین‌زدایی شده، به‌دست‌آمده از حلال نرمال هگزان (در دمای ۲۵ °C و نسبت حلال به خوراک ۹/۵ mL/g) بعد از استخراج، متناسب با خوراک واحد RFCC می‌باشد. اما برای اینکه بقیه مشخصات این محصول متناسب با خوراک RFCC باشد، از تقطیر در خلأ استفاده کرده‌ایم، که در این مرحله جداسازی بازدهی تولید محصول نفت آسفالتین‌زدایی شده از خوراک تقطیر ۹۰٪ می‌باشد و ۱۰٪ آن نیز به باقیمانده آسفالتنی تبدیل می‌گردد.




**شکل ۶** شرایط عملیاتی بهینه بر اساس تابع مطلوبیت (الف) پنتان، (ب) هگزان و (ج) هپتان

بـا اسـتفاده از تقطیـر در خـلاء مشـاهده شـد کـه مشـخصات نفـت آسـفالتین زدایـی شـده متناسـب بـا خـوراک واحـد RFCC اسـت. بجـز درصـد وزنـی گوگـرد، کـه ایـن مشـکل را هـم می‌تـوان در مخـازن خـوراک این واحـد بـا اضافـه کـردن ترکیبـات کـم گوگـرد پالایشـگاه برطـرف نمـود. همچنیـن بازدهـی نفـت آسـفالتین‌زدایی شـده نهایـی به‌دسـت‌آمده ۴۸٪ می‌باشـد (جـدول ۶). نتایـج تسـت‌های قیـر از باقیمانـده آسـفالتینی حاصـل از اسـتخراج و تقطیـر در خـلأ نشـان می‌دهـد به‌جـز تسـت درجـه نفـوذ، بقیـه تسـت‌های گرفته‌شـده کامـلاً متناسـب بـا قیـر ۷۰-۶۰ اسـت (جـدول ۷). بـرای حـل ایـن مشـکل می‌تـوان از برش‌هـای مختلـف نفتـی اسـتفاده کـرد کـه در اینجـا از خـود باقیمانـده بـرج تقطیـر در خـلأ اسـتفاده شـد، ایـن کار نه‌تنهـا مشـکل درجـه نفـوذ قیـر تولیـدی را حـل می‌کنـد بلکـه منجـر بـه کوچک‌ترشـدن واحـد صنعتـی تولیـد نفـت آسـفالت‌زدایی شـده می‌شـود (شـکل ۱).

**جدول ۶** مقایسه مشخصات نفت آسفالتین زدایی شده و خوراک RFCC

| مشخصات | نفت آسفالتین زدایی شده بعد از استخراج | نفت آسفالتین زدایی شده بعد از تقطیر | خوراک RFCC |
|---|---|---|---|
| چگالی ($g/cm^3$) | ۰/۹۶۱۰ | ۰/۹۴۱۳ | ۰/۹۴۰۱ |
| آسفالتین (wt.٪) | ۰/۴۴۷ | <۰/۵ | <۰/۵ |
| کربن باقیمانده (wt.٪) | ۱۳/۶ | <۱ | ۴/۴۵ |
| گوگرد (wt.٪) | ۲/۹۵ | ۱/۹۵ | ۱/۰۱ |
| نیکل (ppm) | ۱۷ | ۵ | ۵/۹ |
| وانادیوم (ppm) | ۳۵ | ۷ | ۸/۷ |

**جدول ۷** مقایسه مشخصات باقیمانده آسفالتینی و قیر استاندارد ۷۰-۶۰

| مشخصات | باقیمانده آسفالتنی | اختلاط باقیمانده آسفالتنی و | | | قیر ۶۰-۷۰ |
|---|---|---|---|---|---|
| | | VB ٪۳۰ | VB ٪۵۰ | VB ٪۱۰۰ | |
| چگالی ($kg/m^3$) | ۱۰۴۵ | ۱۰۴۲ | ۱۰۳۶ | ۱۰۳۰ | ۱۰۱۰-۱۰۶۰ |
| درجه نفوذ (mm/10) | ۹ | ۲۲ | ۳۳ | ۶۱ | ۶۰-۷۰ |
| نقطه نرم شدن (°C) | ۵۹/۷ | ۵۹/۸ | ۵۷/۳ | ۵۵/۵ | ۴۹-۵۶ |
| کشش‌پذیری (cms) | ۱۳۴ | +۱۵۰ | +۱۵۰ | +۱۵۰ | ۱۰۰ min |
| اتلاف به دلیل حرارت (wt.٪) | -۰/۰۱۰۱ | -۰/۰۱۲ | -۰/۰۱۵ | ۰/۰۱۹ | ۰/۲ max |
| کاهش نفوذ پس از حرارت‌دهی (٪) | ۵/۳۷ | ۵/۸۲ | ۶/۷۰ | ۷/۸۵ | ۲۰ max |
| نقطه اشتعال (°C) | ۳۵۵ | ۳۵۲ | ۳۴۶ | ۳۴۰ | ۲۵۰ min |
| حلالیت در کربن دی سولفید (wt.٪) | ۹۹/۸۶ | ۹۹/۸۲ | ۹۹/۸۰ | ۹۹/۷۵ | ۹۹/۵ min |
| تست لکه | - | - | - | - | Negative |

برای رفع مشکل درجه نفوذ باقیمانده آسفالتینی، ابتدا از اختلاط ۳۰ درصد وزنی باقیمانده برج تقطیر در خلأ با باقیمانده آسفالتینی استفاده شد که عدد درجه نفوذ قیر به ۲۲ mm افزایش پیدا کرد، سپس اختلاط ۶۰ درصد وزنی و درنهایت اختلاط ۱۰۰ درصد وزنی باقیمانده برج تقطیر در خلأ با باقیمانده آسفالتینی تست شد که عدد درجه نفوذ قیر به ۶۱ mm افزایش یافت.

## نتیجه‌گیری

در این کار جداسازی آسفالتین از باقیمانده برج تقطیر در خلأ با استفاده از حلال‌های صنعتی پنتان، هگزان و هپتان بررسی شد که نتایج زیر حاصل شد:

- درصد وزنی آسفالتین بهینه‌شده آماری برای حلال‌های نرمال پنتان، هگزان و هپتان به ترتیب ۰/۰۰۲، ۰/۱۰۷ و ۰/۱۸۹ در نسبت حلال به خوراک ۱۰/۷، ۱۳ و ۱۱/۶ mL/g و دمای استخراج ۲۸/۵، ۳۴/۸ و ۳۵ °C به دست آمد.
- درصد وزنی آسفالتین باقیمانده بهینه آزمایشگاهی در شرایط مشابه عملیاتی به ترتیب ۰/۰۰۲۴، ۰/۱ و ۰/۲۱ حاصل شد که با خطای ۱۶٪، ۷٪ و ۱۰٪ تطابق خوبی میان داده آزمایشگاهی و مدل آماری وجود دارد.
- مطالعه آماری نشان داد که مدل درجه دوم پاسخ برای پارامترهای مورد مطالعه قابل‌قبول هستند (P-value <۰/۰۰۰۱) و مطابقت زیادی ($R^2$ =۰/۹۹۵۳) بین مدل آماری (طراحی آزمایش) و داده‌های

آزمایشگاهی وجود دارد. به‌علاوه، طبق آنالیز واریانس، دمای استخراج و برهم‌کنش درجه دوم پارامتر نسبت حلال به خوراک، تأثیر چشمگیری بر درصد وزنی آسفالتین دارند.

• در شرایط بهینه اقتصادی، درصد وزنی آسفالتین برای حلال‌های نرمال پنتان، هگزان و هپتان به ترتیب ۰/۴۵۱، ۰/۴۴۷ و ۰/۵۸۴ در نسبت حلال به خوراک ۶/۵، ۹/۵ و ۱۱ mL/g و دمای استخراج ۲۵ °C (دمای محیط) به دست آمد.

• بر روی نفت آسفالتین زدایی شده حاصل از استخراج حلال نرمال هگزان، تقطیر در خلأ انجام گرفت و میزان باقیمانده کربنی کنرادسون، ترکیبات گوگردی و فلزات نیکل و وانادیوم به ترتیب کمتر از ۱٪ و ۱/۹۵ درصد وزنی، ۵ ppm و ۷ ppm به دست آمدند که متناسب با خوراک واحد RFCC می‌باشد.

• از اختلاط باقیمانده آسفالتینی به‌دست‌آمده با نسبت ۱۰۰ درصد وزنی باقیمانده برج تقطیر در خلأ، قیر استاندارد ۷۰-۶۰ حاصل شد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از واحد تحقیق و توسعه، اداره مهندسی فرآیند و آزمایشگاه شرکت پالایش نفت شازند به دلیل تامین اعتبار مالی و همکاری در انجام این پژوهش بسیار سپاسگزارند.

## مراجع

[1]. Jafari Behbahani T, Talachi H, Taymori M (2009) Study of liquid solvent deasphalting of heavy residues, International Journal of Industrial Engineering and Production Management, 19: 33-39.
[2]. Aske N (2002) Characterisation of crude oil components, asphaltene aggregation and emulsion stability by means of near infrared spectroscopy and multivariate analysis, Norwegian University of Science and Technology, 49.
[3]. Fakher S, Ahdaya M, Elturki M, Imqam A (2019) Critical review of asphaltene properties and factors impacting its stability in crude oil, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 1-18.
[4]. Priyanto S, Mansoori G A, Suwono A (2001) Measurement of property relationships of nano-structure micelles and coacervates of asphaltene in a pure solvent, Chemical Engineering Science, 56: 6933-6939.
[5]. Speight J. (2004) Petroleum Asphaltenes-Part 1: Asphaltenes, resins and the structure of petroleum, Oil and Gas Science and Technology, 59: 467-477.
[6]. Ancheyta J, Trejo F, Rana M S (2010) Asphaltenes: chemical transformation during hydroprocessing of heavy oils, CRC press.
[7]. Andersen S I, Speight J G (2001) Petroleum resins: separation, character, and role in petroleum, Petroleum Science and Technology, 19: 1-34.
[8]. Klein G C, Kim S, Rodgers R P, Marshall A G, Yen A (2006) Mass spectral analysis of asphaltenes. II. Detailed compositional comparison of asphaltenes deposit to its crude oil counterpart for two geographically different crude oils by ESI FT-ICR MS, Energy and Fuels, 20: 1973-1979.
[9]. Processing H (2004) Refining processes handbook, Houston, TX: Gulf Publishing Company.
[10]. Motaghi M, Shree K, Krishnamurthy S (2010) Consider new methods for bottom of the barrel processing: Part 1: CLEAN FUELS, Hydrocarbon Processing (International ed.), 89: 35-40.
[11]. Iqbal R, Khan A, Eng O, Floyd R (2008) Unlocking current refinery constraints, Petroleum technology quarterly, 13.
[12]. Agency U S E P (2013) Study of Selected Petroleum Refining Residuals: Industry Study, BiblioGov.
[13]. Anderson M J, Whitcomb P J (2016) DOE simplified: practical tools for effective experimentation, CRC press.
[14]. Maqbool T, Srikiratiwong P, Fogler H S (2011) Effect of temperature on the precipitation kinetics of asphaltenes, Energy and Fuels, 25: 694-700.
[15]. Aske N, Kallevik H, Johnsen E E, Sjöblom J (2002) Asphaltene aggregation from crude oils and model systems studied by high-pressure NIR spectroscopy, Energy and Fuels, 16: 1287-1295.
[16]. Z Zhang, Peng J, Srinivasakannan C, Zhang Z, Zhang L, Fernández Y, Menéndez J (2010) Leaching zinc from spent catalyst: Process optimization using response surface methodology, Journal Of Hazardous Materials, 176: 1113-1117.
[17]. Junior L C R, Ferreira M S, da Silva Ramos A C (2006) Inhibition of asphaltene precipitation in Brazilian crude oils using new oil soluble amphiphiles, Journal of Petroleum Science and Engineering, 51: 26-36.
[18]. Pandu R G (2016) Multi-objective optimization: techniques and applications in chemical engineering, World Scientific.

[19]. Duan X, Zhang Z, Srinivasakannan C, Wang F, Liang J (2014) Regeneration of spent catalyst from vinyl acetate synthesis as porous carbon: Process optimization using RSM, Chemical Engineering Research and Design, 92: 1249-1256.
[20]. Hou X, Xiao F, Wang J, Amirkhanian S (2018) Identification of asphalt aging characterization by spectrophotometry technique, Fuel, 226: 230-239.
[21]. Nadkarni R, Nadkarni R (2007) Guide to ASTM test methods for the analysis of petroleum products and lubricants, ASTM International West Conshohocken.
[22]. ASTM D (2013) Standard test method for penetration of bituminous materials, USA, ASTM International.
[23]. ASTM D (2014) Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus), American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
[24]. ASTM D (2017) Standard test method for ductility of asphalt materials, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
[25]. Hassan N A, Ruzi N A, Shukry N A M, Jaya R P, Hainin M R, Kamaruddin N H M, Abdullah M E (2019) Physical properties of bitumen containing diatomite and waste engine oil, Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences, 15: 528-531.
[26]. ASTM D (2002) Standard test method for flash and fire points by Cleveland open cup tester, Annual Book of Standards.
[27]. George E, Hunter J S, Hunter W G, Bins R, Kirlin K IV, Carroll D (2005) Statistics for experimenters: design, innovation, and discovery, Wiley New York, NY, USA.
[28]. Tarpey T (2000) A note on the prediction sum of squares statistic for restricted least squares, The American Statistician, 54: 116-118.
[29]. Bingham N H, Fry J M (2010) Regression: Linear models in statistics, Springer Science and Business Media.
[30]. Draper N, Smith H (2014) Applied Regression Analysis, Hoboken; Somerset, in, NJ: John Wiley and Sons.
[31]. Bezerra M A, Santelli R E, Oliveira E P, Villar L S, Escaleira L A (2008) Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry, Talanta, 76, 965-977.
[32]. Telmadarreie A, Trivedi J (2017) Dynamic behavior of asphaltene deposition and distribution pattern in fractured porous media during hydrocarbon solvent injection: pore-level observations, Energy and Fuels, 31: 9067-9079.
[33]. Long J, Shen B, Ling H, Zhao J, Lu J (2011) Novel solvent deasphalting process by vacuum residue blending with coal tar, Industrial and engineering chemistry research, 50, 11259-11269.
[34]. Zendehboudi S, Shafiei A, Bahadori A, James L A, Elkamel A, Lohi A (2014) Asphaltene precipitation and deposition in oil reservoirs–Technical aspects, experimental and hybrid neural network predictive tools, Chemical Engineering Research and Design, 92, 857-875.
[35]. Verdier S, Carrier H, Andersen S I, Daridon J L (2006) Study of pressure and temperature effects on asphaltene stability in presence of CO2, Energy and Fuels, 20: 1584-1590.
[36]. Hussain H K, Ali S M, Ali Y M (2011) Upgrading sharky baghdad heavy crude oil, Al-Khwarizmi Engineering Journal, 7: 19-29.
[37]. Wang Y, Chen Z, Shen B (2012) The Dual-purpose of solvent deasphalting integrated with FCC for production of qualified pavement asphalt and FCC feedstock to realize its maximum potential, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 34: 1187-1195.
[38]. Rezaei N, Mohammadzadeh O, Chatzis I (2010) Warm VAPEX: a thermally improved vapor extraction process for recovery of heavy oil and bitumen, Energy and Fuels, 24: 5934-5946.
[39]. Myers R H, Montgomery D C, Anderson-Cook C M (2016) Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, John Wiley and Sons.
[40]. Candioti L V, De Zan M M, Cámara M S, Goicoechea H C (2014) Experimental design and multiple response optimization, using the desirability function in analytical methods development, Talanta, 124: 123-138.
[41]. Gafonova O V, Yarranton H W (2001) The stabilization of water-in-hydrocarbon emulsions by asphaltenes and resins, Journal of Colloid and Interface Science, 241: 469-478.
[42]. Hu Y F, Guo T M (2001) Effect of temperature and molecular weight of n-alkane precipitants on asphaltene precipitation, Fluid Phase Equilibria, 192: 13-25.
[43]. Udourioh G A, Ibezim-Ezeani M I, Ofodile S E (2014) Comparative investigation of heavy organics precipitation from crude oil using binary mixtures and single n-alkane organic solvents, Journal of Petroleum and Gas Exploration Research, 4: 53-59.
[44]. Tobrise O O, Ofodile S E, Osu C, Achugasim O (2016) Comparative evaluation of asphaltene precipitation from nigerian crude oil residue using intermediate and long chain single and binary n-alkane solvent mixtures, IOSR Journal of Applied Chemistry, 9: 82-86.

# طراحی سیستم کنترل پیشبین غیرخطی مبتنی بر مدل برای فرازآوری با استفاده از پمپ الکتریکی درون‌چاهی

**فریدالدین میرزایی هرسینی و مهدی نظری‌صارم***
گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، دانشکده عمران ومنابع زمین،دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۱

**چکیده**

فرازآوری مصنوعی با پمپ الکتریکی درون‌چاهی یکی از روش‌های متداول چاه محور برای افزایش یا نگهداشت تولید از چاه است. به‌منظور افزایش بازدهی، رعایت محدودیت‌های عملیاتی و ایمنی و کاهش زمان و هزینه تعمیرات به سیستم کنترل مناسب نیاز است. کنترل فرآیند فرازآوری با توجه به تعداد پارامترهای عملیاتی و محدودیت‌های ایمنی مجموعه تولید شامل مخزن، چاه و پمپ، کاری چالش برانگیز است. روش‌های مختلفی برای کنترل فرازآوری با پمپ الکتریکی درون‌چاهی پیشنهاد شده است. کنترل مبتنی بر این روش‌ها یا به‌علت استفاده از تقریب خطی برای مدل‌سازی فرآیند فرازآوری از دقت کافی برخوردار نیستند یا به‌دلیل استفاده از روابط دینامیک و حل آن‌ها برای شبیه‌سازی فرآیند و بار سنگین محاسباتی قابلیت پیاده‌سازی برروی سخت‌افزارهای مرسوم را ندارند. در این تحقیق یک سیستم کنترل پیشبین غیر خطی متناسب با اهداف کنترلی فرآیند فرازآوری با پمپ الکتریکی درون‌چاهی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی و ایمنی توسعه داده شده است. علاوه‌براین به‌منظور کاهش بار محاسباتی و با در نظر گرفتن طبیعت غیر خطی فرآیند، از یک مدل غیر خطی با ساختار مبتنی بر شبکه‌های عصبی به‌عنوان مدل پیشبین در ساختار کنترل‌کننده استفاده شده است. به‌منظور بررسی کارایی کنترل‌کننده و مدل توسعه داده شده، عملکرد کنترل‌کننده برروی چاه شماره ۸۸ میدان اهواز– آسماری منتخب نصب پمپ الکتریکی درون‌چاهی ارزیابی شده است. کنترل‌کننده توسعه داده شده به‌خوبی رفتار مرجع را پیروی کرده و از طرف دیگر به‌خوبی اغتشاشات ورودی به سیستم را جبران‌سازی می‌کند. همچنین طراحی کنترل‌کننده به گونه‌ای است که محدودیت‌های عملیاتی و ایمنی در ساختار کنترل‌کننده وارد شده و رفتار سیستم به گونه‌ای تنظیم می‌شود که این محدودیت‌ها نقض نشوند.

**کلمات کلیدی: فرازآوری مصنوعی، پمپ الکتریکی درون‌چاهی، شبکه عصبی، کنترل‌کننده**

---

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی mah.nazari_sarem@iauctb.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4734.3124)

**مقدمه**

پمپ الکتریکی درون‌چاهی (ESP) یکی از محبوب‌ترین روش‌های فرازآوری مصنوعی مورد استفاده در صنایع نفت و گاز محسوب می‌شود. یک پمپ الکتریکی درون‌چاهی[1] متشکل از یک پمپ سانتریفیوژی چند مرحله‌ای است که به‌منظور افزایش فشار سیال تولیدی چاه و تولید با دبی مطلوب در عمق چند صد متری تا چند هزار متری درون چاه نصب می‌شود. با وجود بهره‌وری بالای فرازآوری با پمپ ESP، استفاده از این روش در محدوده وسیعی از شرایط عملیاتی به‌علت ناحیه کاری محدود و غیرمنعطف پمپ ESP ممکن نبوده و عملکرد طولانی مدت پمپ در خارج از محدوده کاری تعیین شده می‌تواند منجر به افت شدید عملکرد و وارد شدن آسیب مکانیکی غیر قابل جبران به پمپ گردد [۱]. امروزه در بسیاری از چاه‌های با اجرای ESP از راه اندازهای سرعت متغیر[2] استفاده می‌شود. استفاده از راه انداز سرعت متغیر به بهره‌بردار اجازه می‌دهد متناسب با شرایط عملیاتی و بهره‌برداری، سرعت چرخش پمپ و در نتیجه نقطه عملکرد پمپ را تغییر داده تا بتوان از پمپ در ناحیه عملیاتی وسیع‌تری استفاده کرد [۴-۲]. کنترل دستی فرآیند فرازآوری با توجه به تعداد پارامترهای عملیاتی و محدودیت‌های ایمنی مجموعه تولید شامل مخزن، چاه و پمپ، کاری چالش برانگیز است [۵]. تخمین زده شده است که در حدود ۲۳٪ از خرابی‌های پمپ ESP به‌علت خطای اپراتور در کنترل پمپ رخ می‌دهد. در نتیجه، سیستم کنترل اتوماتیک جهت کنترل و نظارت بر عملیات فرازآوری برای اطمینان از عملکرد مطلوب و رعایت محدودیت‌های عملیاتی و ایمنی مورد نیاز است [۶]. روش‌های مختلفی برای کنترل فرازآوری با پمپ ESP پیشنهاد شده است. شارما و همکارش از کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی (PI) برای کنترل سرعت پمپ و بازشدگی شیر سرچاهی به‌منظور کنترل دبی سیال تولیدی استفاده کردند اما در طراحی آن‌ها هدف اصلی، بهینه‌سازی شرایط تولید بوده و اثر ورود اغتشاشات به مجموعه فرازآوری در نظر گرفته نشده بود [۷]. بایندر و همکارانش مدلی دینامیک برای فرازآوری با پمپ ESP توسعه دادند و از مدل توسعه داده شده در طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین خطی[3] (LMPC) استفاده کردند. کنترل فشار ورودی پمپ و کاهش مصرف انرژی اهداف اصلی سیستم کنترل طراحی شده بود [۸]. پاولو و همکارانش در مطالعه‌ای [۶] چالش‌های طراحی سیستم کنترل برای فرآیند فرازآوری را بررسی کردند و یک سیستم کنترل LMPC برای فرازآوری پمپ ESP پیشنهاد دادند. کرشنامورثی و همکارانش نیز برای کنترل فرازآوری با پمپ ESP از کنترل LMPC استفاده کردند. آن‌ها برای کاهش اتلاف انرژی، شیر سرچاهی را تا بیشترین مقدار ممکن باز نگه داشتند [۹].

کنترل‌کننده پیشنهادی پاولو، بایندر و کرشنامورثی از مدل‌های خطی برای کل ناحیه عملکردی پمپ استفاده می‌کند. با توجه به ذات غیرخطی فرآیند فرازآوری ESP، استفاده از مدل خطی سبب می‌شود تعدادی از دینامیک‌های فرآیند برداشت نشده و سیستم کنترل در صورت تغییرات بزرگ در ناحیه عملیاتی به درستی عمل نکند. دلو و همکارانش برای رفع این مشکل از کنترل LMPC با راهبرد انطباقی[4] استفاده کردند [۱۰]. در طرح پیشنهادی آن‌ها، برای نواحی مختلف عملیاتی پمپ مدل‌های مختلفی توسعه داده شد و در صورت ورود پمپ به هر ناحیه سیستم کنترل از مدل مربوط به همان ناحیه برای پیش‌بینی استفاده می‌کرد.

اورم و همکارش برای کنترل پمپ‌های ایستگاه‌های پمپاژ زیر دریایی که مشابه فرآیند فرازآوری است یک سیستم کنترل پیش‌بین غیرخطی[5] (NMPC) توسعه دادند [۱۱].

1. Electrical Submersible Pump
2. Variable Speed Drive
3. Linear Model Predictive Controller
4. Adaptive
5. Nonlinear Model Predictive Controller

آن‌ها از مدل غیرخطی به‌دست آمده از روابط دینامیک حاکم بر عملکرد پمپ و حل مستقیم این روابط به‌عنوان مدلی برای پیش‌بینی رفتار سیستم در کنترل‌کننده استفاده کردند. همان‌طور که شرح داده شد، اکثر سیستم‌های کنترل پیشنهاد شده بر پایه مدلی خطی از فرآیند فرازآوری طراحی شده‌اند. استفاده از تقریب خطی در طراحی کنترل‌کننده با توجه به ماهیت غیرخطی فرآیند فرازآوری در صورت انحراف از شرایط طراحی، تغییر نسبتاً بزرگ پارامترهای عملیاتی و یا ورود اغتشاشات بزرگ به سیستم سبب شکست کنترل‌کننده شده و فرآیند رفتاری نامطلوب یا پیش‌بینی نشده از خود نشان می‌دهد که می‌تواند سبب مخاطرات ایمنی شود. در دسته دیگری از کنترل‌کننده‌ها از مدل‌های جبری و دیفرانسیلی برای مدل‌سازی فرآیند استفاده شده است. گرچه دقت این دسته از مدل‌ها بسیار بالاست اما بار محاسباتی بالای آن‌ها، پیاده‌سازی کنترل‌کننده طراحی شده با این روش برروی سخت‌افزارهای مرسوم را غیرعملی می‌کند.

هدف این تحقیق، توسعه یک سیستم کنترل جهت پاسخ‌گویی مناسب به نیازمندی‌های کنترلی فرآیند فرازآوری ESP است. با توجه به طبیعت غیرخطی فرآیند فرازآوری، چند متغیره بودن سیستم و با در نظر گرفتن چند هدفه بودن مسئله کنترل، کنترل‌کننده پیش‌بین غیرخطی مبتنی بر مدل به‌عنوان گزینه مناسب انتخاب شده است. جهت رعایت محدودیت‌های ایمنی و عملیاتی، قیود مختلف در ساختار کنترل‌کننده تعریف شده است. همچنین به‌منظور کاهش بار محاسباتی کنترل‌کننده از مدل دینامیک غیرخطی NARX و ساختار شبکه‌های عصبی موجک در ساختار کنترل‌کننده و بخش پیش‌بینی استفاده می‌شود. استفاده از مدل و کنترل‌کننده غیرخطی سبب می شود که سیستم تحت کنترل تحت شدیدترین اغتشاشات و تغییرات نیز به‌خوبی رفتار مرجع را دنبال کرده و اغتشاشات را جبران‌سازی کند. در انتها عملکرد مدل توسعه داده شده و کنترل‌کننده طراحی شده برروی یک چاه منتخب نصب پمپ ESP ارزیابی می‌شود.

## بیان مسئله کنترل

هدف اصلی از کنترل مجموعه فرازآوری افزایش سود با بیشینه کردن نرخ تولید و کمینه کردن توان مصرفی است درحالی‌که محدودیت‌های عملیاتی و ایمنی چاه و پمپ حفظ شده، به پمپ آسیبی نرسیده و عملیات بهره‌برداری از چاه با اخلال مواجه نشود.از آنجایی‌که نرخ تولید چاه به‌طور مستقیم به فشار کف چاه ($P_{bh}$) وابسته است، یکی از روش‌های اصلی کنترل پمپ ESP، کنترل فشار ورودی پمپ ($P_{In}$) مطابق یک رفتار مرجع ($P^{Ref}_{In}$) است، درحالی‌که توان مصرفی پمپ (BHP) کمینه شده یا به یک بازه مشخص محدود شده باشد.

$$P_{In} \rightarrow P_{In}^{Ref} \quad (۱)$$

$$\text{minimize } BHP \text{ or } BHP \le BHP_{\max} \quad (۲)$$

در کنار این دو هدف اصلی نیاز است قیود و محدودیت‌های زیر نیز در نظر گرفته شوند.

• هد تولیدی پمپ از مقدار قابل تحمل پمپ بیشتر نباشد.

$$P_{ESP} \le P_{ESP}^{Max} \quad (۳)$$

• سرعت چرخش پمپ در بازه طراحی شده باشد.

$$r_{\min} \le r \le r_{\max} \quad (۴)$$

• مقدار بازشدگی شیر جهت کاهش اتلاف انرژی بیشینه باشد.

$$s \rightarrow s_{\max} \quad (۵)$$

• نرخ تغییرات سرعت پمپ و سرعت باز و بسته شدن شیر به‌دلیل محدودیت‌های مکانیکی، محدود است.

$$|\Delta r| \le \Delta r_{\max}$$
$$|\Delta s| \le \Delta s_{\max} \quad (۶)$$

به‌منظور اعمال کنترل روی فرآیند فرازآوری، دو ورودی کنترلی در مجموعه فرازآوری در نظر گرفته شده است.

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶۱-۱۴۵

اولین ورودی، فرکانس تغذیه موتور کوپل شده به پمپ ESP یا سرعت چرخش پمپ (r) می‌باشد. ورودی دوم میزان بازشدگی شیر خفه‌کننده سرچاهی[1] (s) است. در نتیجه برای کنترل فرآیند فرازآوری نیاز به کنترل‌کننده‌ای چندمتغیره، چندهدفه و با قابلیت در نظر گرفتن قیود و محدودیت‌ها داریم که بتواند به‌خوبی نسبت به تغییرات مرجع پاسخ داده و اغتشاشات ورودی به سیستم را جبران کند.

## کنترل‌کننده

با توجه به نیازمندی‌های کنترلی و غیرخطی بودن فرآیند فرازآوری، در این تحقیق کنترل‌کننده پیش‌بین غیر خطی مبتنی بر مدل (NMPC) پیشنهاد شده است. کنترل‌کننده NMPC، یک نمونه از روش‌های کنترل پیشرفته است که در آن کنترل‌کننده با استفاده از مدل دینامیک غیرخطی از فرآیند تحت کنترل، خروجی سیستم را برای بازه افق پیش‌بینی $n_p$ در هر لحظه t محاسبه می‌کند. سپس با توجه به ملاک مشخص و با در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم، رفتار مجموعه تحت سناریوهای مختلف را پیش‌بینی کرده، بهینه‌ترین ورودی کنترلی را انتخاب کرده و به سیستم اعمال می‌کند [۱۳ و ۱۲]. راهبرد کنترل‌کننده پیش‌بین در شکل ۱ نمایش داده شده است. تابع هدف در کنترل‌کننده NMPC معمولاً مطابق رابطه ۷ به‌صورت مجموع انحراف رفتار پیش‌بینی شده سیستم $\hat{y}_p(t)$ از رفتار مرجع $y_{ref}(t)$ در بازه افق پیش‌بینی $n_p$ و میزان انرژی مصرفی برای کنترل سیستم یا به‌عبارت دیگر، تغییرات سیگنال کنترل $\Delta u(t)$ در بازه افق کنترل $n_u$ مدل می‌شود.

(۷)

$$\pi(u)=\sum_{i=n_1}^{n_p}\lambda_1(i)\left[y_{ref}(t+i)-\hat{y}_p(t+i\mid t)\right]^2+\sum_{i=1}^{n_u}\lambda_2(i)\left[\Delta u(t+i-1)\right]^2$$

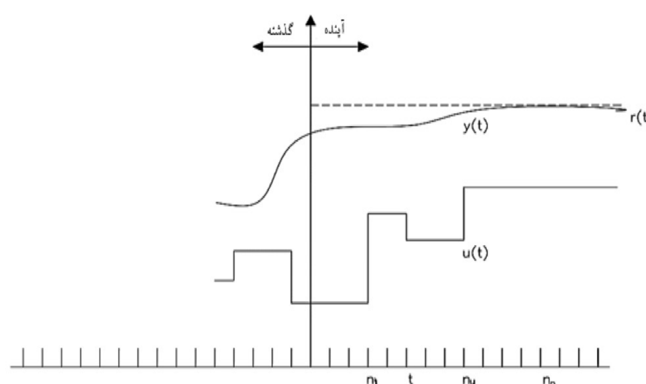
به‌منظور محاسبه سیگنال کنترلی $u(t)$ در هر لحظه نیاز است با کمک روش‌های بهینه‌سازی، مسئله (۸) تحت قیود غیر خطی (۹) حل کنیم و سپس خروجی کنترلی محاسبه شده را به سیستم اعمال کنیم.

$$\min_u \pi(u) \qquad (۸)$$

$$\begin{cases} y_{\min}\le y(t)\le y_{\max}\\ u_{\min}\le u(t)\le u_{\max}\\ \Delta u_{\min}\le \Delta u(t)\le \Delta u_{\max}\end{cases} \qquad (۹)$$

### تخمین مدل غیرخطی

همان‌طور که گفته شد، فرآیند فرازآوری با پمپ ESP یک فرآیند دینامیک غیر خطی است. از طرف دیگر برای پیش‌بینی رفتار سیستم تحت سناریوهای مختلف در کنترل‌کننده نیاز به یک مدل از سیستم تحت بررسی داریم. استفاده از مدل‌های تحلیلی و حل روابط دیفرانسیل حاکم بر آن‌ها کاری بسیار




**شکل ۱** راهبرد کنترل‌کننده پیشبین

1. Wellhead Choke Valve

زمان‌بر بوده و از نظر محاسباتی پرهزینه است. لذا در این این تحقیق سعی می‌کنیم رفتار مجموعه فرازآوری را با استفاده از مدل‌های ساده‌تر تخمین بزنیم. گرچه استفاده از مدل‌های تخمینی دقت را کاهش می‌دهند اما حلقه بازخورد کنترل‌کننده کاهش دقت حاصل شده را جبران می‌کند. در فرآیندهای دینامیک مقدار خروجی مطابق رابطه ۱۰در هر لحظه t وابسته به مقادیر فعلی و گذشته ورودی و مقادیرگذشته خروجی است.

$$y(t) = f(\phi(t,\theta),\theta) \quad (۱۰)$$

که در آن $y(t)$ مقدار خروجی مدل، $\phi(t,\theta)$ بردار رگرسورها، $\theta$ مجموعه پارامترهای مدل و $f$ یک تابع غیرخطی است. انتخاب رگرسورها معمولاً براساس دانش از فرآیند تحت بررسی و سعی و خطا انجام می‌شود. یکی از انواع رگرسورهای محبوب در تخمین فرآیندهای غیرخطی استفاده از مدل NARX[1] می‌باشد که مطابق رابطه ۱۱ رگرسورهای آن مبتنی بر مجموعه‌ای از ورودی و خروجی‌های گذشته فرآیند است [۱۴ و ۱۵].

$$\phi(t) = \quad (۱۱)$$
$$[y(t-1),\dots,y(t-n_a),u(t-n_a),\dots,u(t-n_k-n_b)]^T$$

پس از انتخاب رگرسورهای مدل (یا به‌عبارت دیگر مقادیر ) لازم است تابع غیرخطی مدل نیز تعیین شود. تابع $f$ باید به گونه‌ای انتخاب شود که پس از مشخص کردن مجموعه پارامترهای $\theta$ نگاشتی صحیح میان رگرسورهای مدل و خروجی مدل پیاده‌سازی کند. انتخاب‌های زیادی برای ساختار تابع مدل وجود دارد. در این تحقیق از شبکه‌های عصبی برای این منظور استفاده می‌شود.

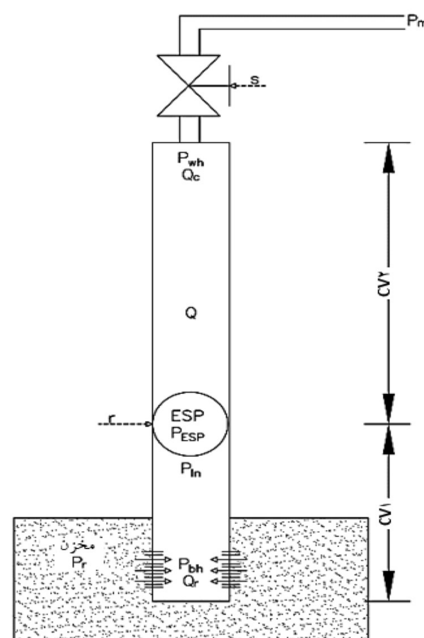
شبکه‌های عصبی با الگوگیری از شبکه‌های عصبی زیستی، خانواده‌ای از توابع غیرخطی متشکل از واحدهای پردازشی ساده به نام نورون هستند که در یک شبکه به‌کمک اتصالاتی با وزن مشخص به یک دیگر متصل شده‌اند. نوع، تعداد و نحوه اتصال نورون‌ها در شبکه و وزن اتصالات بین آن‌ها تعیین‌کننده رفتار شبکه است. از نقاط قوت شبکه‌های عصبی آموزش‌پذیری آن‌ها است به این معنی که با ارائه مجموعه مثالی از داده‌های ورودی و خروجی یک سیستم، یک شبکه عصبی را می‌توان به گونه‌ای آموزش داده که رفتار مشابه سیستم اصلی را در خروجی برای ورودی‌های مشابه تولید کند. از طرف دیگر، شبکه‌های عصبی پس از آموزش دیدن قادر به تعمیم نتایج یادگیری برای ورودی‌های دیده نشده هستند. در واقع، یک شبکه عصبی در کنار حافظه، قدرت تعمیم دادن نیز دارد. برای آموزش مدل، تعیین پارامترها و آرایش شبکه لازم است از سیستم تحت بررسی داده جمع‌آوری شود. برای این منظور ورودی‌های سیستم مد نظر طی آزمایش یا شبیه‌سازی کامپیوتری به شکل مناسب تحریک شده و رفتار خروجی ثبت می‌شود. سپس از این مجموعه ورودی و خروجی برای آموزش، تست و ارزیابی مدل به‌دست آمده استفاده می‌شود. به همین دلیل نیاز است با استفاده از روابط حاکم بر فرآیند تحت نظر شبیه‌سازی لازم در محیط مناسب انجام شود.

### روابط حاکم بر فرآیند فرازآوری

شمای ساده‌ای از فرآیند فرازآوری و چاه در شکل ۲ نمایش داده شده است. پمپ ESP افزایش فشار لازم برای سیال تولیدی که از فصل مشترک چاه و مخزن به چاه وارد شده است را فراهم می‌کند. سیال با فشار بالاتر سپس با دبی مطلوب از طریق مسیر چاه و شیر سرچاهی به خطوط انتقال و چندراهه‌ها وارد شده و به سمت واحدهای بهره‌برداری جریان می‌یابد. در ادامه، به شکل خلاصه بخش‌های مختلف مجموعه فرازآوری را بررسی کرده و روابط حاکم در هر بخش را شرح می‌دهیم. در این تحقیق از روابط ارائه شده در مراجع [۸،۹،۱۶ و ۱۹] استفاده می‌شود.

1. Nonlinear Autoregressive Exogenous Model

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶۱-۱۴۵




**شکل ۲** شمای فرازآوری با پمپ ESP

### تولید از مخزن

توانایی مخزن در تولید به‌کمک روابط عملکرد جریانی یا IPR که توصیف کننده ارتباط میان نرخ تولید از مخزن ($Q_r$) و گرادیان فشار بین مخزن و چاه است، مطابق رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$Q_r = J(\overline{P_r} - P_{bh}) \quad (۱۲)$$

روابط IPR تحلیلی و تجربی متعددی براساس رژیم جریانی، فشار مخزن، چاه و فشار نقطه حباب سیال مخزن و شرایط سیال تولیدی معرفی و توسعه داده شده‌اند. در این تحقیق با در نظر گرفتن این شرایط در هر مورد از روابط Productivity Index، Vogel یا دیگر روابط معرفی شده در مرجع [۲۰] استفاده می‌شود.

### جریان سیال در لوله تولید

برای مدل‌سازی دینامیک جریان سیال تولیدی در مسیر تولید می‌توان حرکت سیال را به‌صورت جریان تک بعدی در لوله عمودی در نظر گرفت [۱۷ و ۲۱]. در این صورت مطابق قانون پایستگی جرم خواهیم داشت،

$$\frac{\partial PA}{\partial t} + \frac{\partial \rho A v}{\partial z} = 0 \quad (۱۳)$$

که در آن $P$ فشار سیال در زمان $t$ در نقطه $z$ در طول مسیر تولید بوده، $A$ سطح مقطع مسیر تولید و $v$ سرعت سیال است.

همچنین، از قانون پایستگی تکانه خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \rho A \vartheta}{\partial t} + \frac{\partial (\rho A \vartheta)^2}{\partial z} = -A\frac{\partial \rho A \vartheta}{\partial t} - F - \rho A g\frac{\partial h}{\partial z} \quad (۱۴)$$

که در آن $F$ تلفات فشار ناشی از اصطکاک سیال و $h$ ارتفاع سیال در چاه است. حال با تقسیم مسیر تولید از کف چاه تا سرچاه به حجم‌های کنترلی مختلف می‌توان روابط ۱۳و ۱۴ را با در نظر گرفتن فرض‌های ساده‌سازی (روابط ۱۷-۱۵) به‌صورت ساده شده برای هر حجم کنترلی در نظر گرفت. همچنین با توجه به کاربرد مدل برای طراحی کنترل‌کننده، در نظر گرفتن تنها دو حجم کنترلی $CV_1$ از کف چاه تا ورودی پمپ و $CV_2$ از خروجی پمپ تا قبل از شیر سرچاهی کفایت می‌کند [۶]. با این عمل حجم محاسبات لازم به‌شدت کاهش یافته و کاهش دقت حاصل شده در این ساده‌سازی به‌وسیله حلقه بازخورد در نظر گرفته شده در ساختار کنترل‌کننده جبران می‌شود.

**فرض اول:** انباشت سیال در هر حجم کنترلی صفر است.

$$Q_1 = Q_2 = Q \quad (۱۵)$$

**فرض دوم:** تغییرات فشار در هر نقطه از هر حجم کنترلی برابر تغییرات فشار متوسط حجم کنترلی می‌باشد

$$\dot{\bar{P}} = \frac{\partial P(z,t)}{\partial t}, \forall z \quad (۱۶)$$

**فرض سوم:** تغییرات چگالی ($\rho$) سیال ناشی از تغییرات دما و فشار سیال است، اما با توجه به کندتر بودن دینامیک‌های فشار می‌توان از اثر تغییرات دما صرف نظر کرد. در نتیجه خواهیم داشت:

$$d\rho = \frac{\rho_0}{\beta} dP \quad (۱۷)$$

که در آن $\beta$ مدولوس حجم سیال[1] بوده و $\rho_0$ چگالی سیال در شرایط استاندارد است.

1. Fluid Bulk Modulus

حال با در نظر گرفتن فرض‌های بالا و انتگرال‌گیری از روابط ۱۳ و ۱۴ در طول حجم کنترلی می‌توان روابط دیفرانسیلی زیر را به‌دست آورد:

$$\frac{V_1}{\beta_1}\frac{dP_{bh}}{dt} = Q_r - Q \quad (۱۸)$$

$$\frac{V_2}{\beta_2}\frac{dP_{wh}}{dt} = Q - Q_c \quad (۱۹)$$

$$M\frac{dQ}{dt} = (P_{bh} - P_{wh} - F - \rho gh + \Delta P_{ESP}) \quad (۲۰)$$

که در آن $V_1$ و $V_2$ حجم هر بخش از مسیر تولید، $P_{bh}$ فشار کف چاه، $P_{wh}$ فشار سرچاه، $Q_r$ دبی تولید از مخزن، $Q_c$ دبی عبوری از شیر سرچاهی و $\Delta P_{ESP}$ افزایش فشار تولید شده توسط پمپ است.

برای محاسبه افت فشار ناشی از اصطکاک از رابطه ۲۱ که در مرجع [۱] معرفی شده است، استفاده می‌شود.

برای محاسبه افت فشار ناشی از اصطکاک از رابطه ۲۱ که در مرجع [۱] معرفی شده است، استفاده می‌شود.

$$F = \alpha\left(\frac{\mu}{\rho DQ}\right)^{0.25}\frac{l\rho Q^2}{DA^2} \quad (۲۱)$$

که در آن $\mu$ گرانروی سیال، $l$ طول مسیر تولید و $D$ قطر سطح مقطع مسیر تولید است.

برای محاسبه پارامتر اینرسی سیال ( )نیز می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$M = \int_l \frac{\rho(z)}{A(z)}dz \quad (۲۲)$$

**پمپ**

پارامترهای عملکردی پمپ مانند هد تولید شده، توان مصرفی و بازدهی پمپ در هر دبی توسط سازندگان پمپ ESP در نمودارهایی با عنوان نمودار عملکردی پمپ ارائه می‌شود. اما این نمودارها معمولا برای سیال استاندارد (آب) در شرایط دما و فشار استاندارد (مطابق با API RP 11S2) تولید شده‌اند. برای محاسبه عملکرد پمپ در سرعت‌های چرخش متفاوت و سیال با گرانروی متفاوت از سیال استاندارد نیاز است که مقادیر گزارش شده اصلاح شوند. مطابق قانون Affinity برای پمپ با سایز پره ثابت در سرعت‌های مختلف روابط زیر برقرار است:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{r_2}{r_1} \quad (۲۳)$$

$$\frac{P_{ESP-2}}{P_{ESP-1}} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$

$$\frac{BHP_2}{BHP_1} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^3$$

درخصوص اثر گرانروی بر عملکرد پمپ، برای نفت سبک یا سیالات با گرانروی نزدیک به سیال استاندارد نیازی به اصلاح مقادیر ناست. اما درصورتی‌که سیال پمپ شده گرانروی بسیار بالاتری از آب داشته باشد نیاز است که منحنی‌های عملکرد پمپ مطابق روابط زیراصلاح شوند:

$$Q_{vis} = C_Q Q_w \quad (۲۴)$$

$$H_{vis} = C_H H_w$$

$$\eta_{vis} = C_\eta \eta_w$$

ضرایب $C_Q$، $C_H$ و $C_\eta$ برای سیالات با گرانروی مختلف توسط مؤسسه هیدرولیک در نمودارها و جداول مختلف گزارش شده است. در این تحقیق از روش تورزو و همکارنش استفاده می‌شود. آن‌ها با برازش منحنی مناسب برروی نمودارهای ارائه شده توسط موسسه هیدرولیک، روشی به مراتب سریع‌تر برای محاسبه ضرایب اصلاحی براساس تابعی از نرخ تولید تصحیح شده $Q^*$ که خود تابعی از دبی $Q_{BEP}$ و هد تولید شده $H_{BEP}$ در نقطه بهینه عملکرد پمپ[1] است، به‌دست آوردند. این روش به تفصیل در مرجع [۲۲] شرح داده شده است.

**شیر سرچاهی**

برای محاسبه دبی سیال عبوری از شیر سرچاهی ($Q_C$) از رابطه ۲۵ حاصل شده از ساده‌سازی روابط برنولی که در استاندارد ISA 75.01 به‌عنوان رابطه استاندارد شیرهای کنترلی معرفی شده است استفاده می‌شود [۲۳].

$$Q_C = sC_V\sqrt{\frac{P_m - P_{wh}}{\rho}} \quad (۲۵)$$

که در آن $P_m$ فشار پایین دست چاه و $C_V$ ضریب شیر است که توسط سازنده شیر اعلام می‌شود.

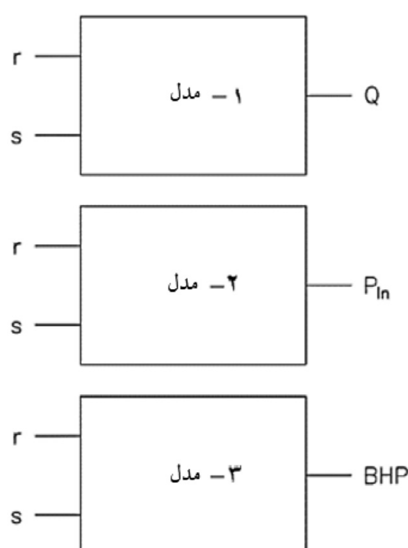
1. Best Efficiency Point

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶۱-۱۴۵

## شبیه‌سازی و نتایج

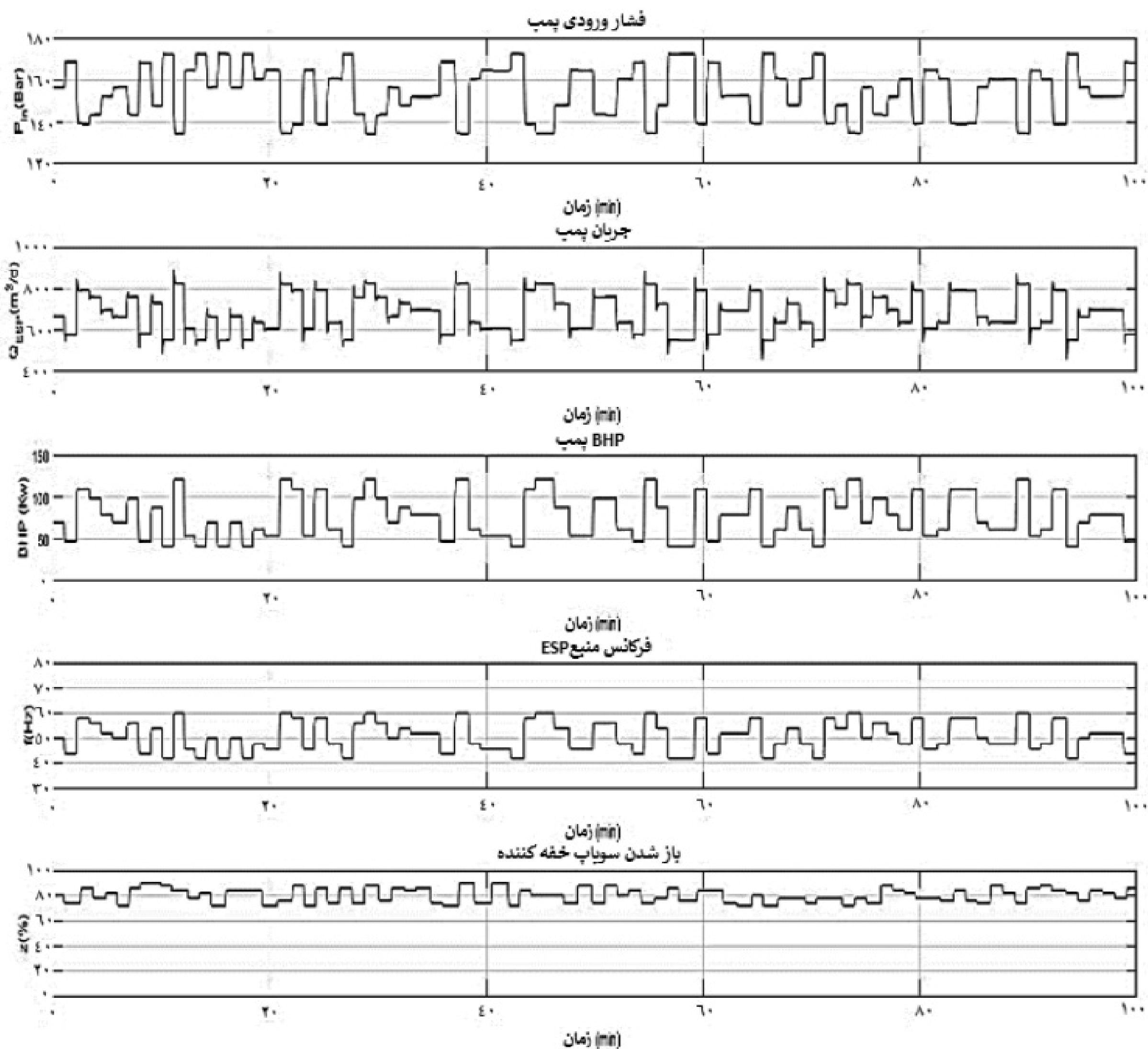
در این تحقیق به‌منظور بررسی عملکرد کنترل‌کننده توسعه داده شده برروی یک مسئله واقعی، از کنترل‌کننده NMPC برای کنترل چاه شماره ۸۸ میدان اهواز آسماری استفاده شده است. شبیه‌سازی فرآیند و سیستم کنترل در محیط MATLAB پیاده‌سازی شده است. چاه شماره ۸۸ میدان اهواز آسماری با فشار متوسط مخزن bar ۲۵۹ و شاخص تولید $7/14$ m³/day به‌ازای هر بار به‌جهت افزایش نرخ تولید از دبی کنونی ۱۷۴/۸ به دبی دلخواه ۶۶۷/۴ m³/day منتخب نصب پمپ ESP است. مطابق طراحی صورت گرفته در نرم‌افزار Pipesim، پمپ شرکت Centrilift با شماره P47 با بازده بیشینه ۷۰٪ و تأمین هد bar ۶۲/۵ در ۸۲ مرحله با دامنه تولید ۴۴۵ تا ۹۰۶ m³/day در عمق ۲۲۹۰ m دورن چاه در نظر گرفته شده است.

اولین مرحله، طراحی یک مدل غیرخطی از فرازآوری چاه شماره ۸۸ برای استفاده به‌عنوان مدل پیشبین در کنترل‌کننده NMPC است. با توجه به توضیحات ارائه شده، مدل مد نظر باید دارای دو ورودی $r$ و $s$ بوده و مقادیر فشار ورودی پمپ $P_{In}$، توان مصرفی $BHP$ و دبی تولیدی $Q$ را در خروجی تخمین بزند. برای این منظور از سه مدل NARX چند ورودی و یک خروجی مانند شکل ۳ استفاده می‌کنیم. برای آموزش شبکه‌ای که توانایی مناسب در تخمین خروجی سیستم در شرایط مختلف را داشته باشد لازم است مجموعه داده ورودی و خروجی مناسب از سیستم تولید کنیم. برای این منظور با استفاده از مولد سیگنال شبه تصادفی[1] ورودی‌های $r$ و $s$ به تعداد ۱۵۰۰ نمونه با دامنه و بازه زمانی تصادفی و تغییرات تصادفی تولید می‌کنیم. سیگنال‌های تحریک تولید شده و پاسخ سیستم در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند. در مرحله بعد داده‌ها را به‌ترتیب به سه دسته ۱۰۰۰ تایی، ۳۰۰ تایی و ۲۰۰ تایی برای آموزش، تست و ارزیابی مدل (شبکه) تقسیم کرده و برای جلوگیری از اثرگذاری واحد کمیت‌ها برروی شبکه، مقادیر را به بازه $[-1,1]$ تبدیل می‌کنیم. در این تحقیق از شبکه‌های عصبی موجک[2] یا Wavenet استفاده شده است. شبکه‌های عصبی موجک از توابع موجک[3] به‌عنوان توابع فعال‌سازی شبکه عصبی استفاده می‌کنند.




**شکل ۳** مدل‌های تخمین‌زده شده

1. Pseudo Random Signal Generator
2. Wavelet Neural Network
3. Wavelet Functions



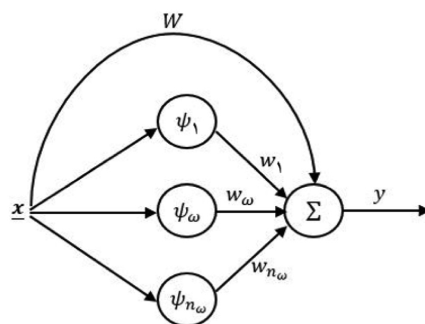

**شکل ۴** سیگنال‌های ورودی و خروجی آزمایش

محدود بودن دامنه پوشش توابع موجک، راحتی تعمیم توابع موجک به چند بعد و امکان استفاده از خاصیت چند تفکیکی[1] توابع موجک برای آموزش شبکه عصبی از دلایل اصلی این انتخاب است [۲۴ و ۲۵]. ساختار شبکه در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که اشاره شد تعداد ۳ مدل شبکه عصبی با سه لایه شامل لایه ورودی، لایه پنهان (لایه شامل توابع موجک) و لایه خروجی به‌عنوان مدل برای پیش‌بینی رفتار سیستم در کنترل‌کننده با استفاده از داده های تولید شده تخمین زده شد. برای انتخاب رگرسورهای هر مدل پس از آموزش تعدادی مدل با مجموعه رگرسورهای مختلف بهترین مجموعه از رگرسورها که بهترین عملکرد را برروی داده‌های تست و ارزیابی داشتند انتخاب شدند. رگرسورهای انتخاب شده، تعداد نورون‌های هر شبکه و عملکرد مدل بعد از پایان آموزش برروی داده‌های ارزیابی در جدول ۱ نمایش داده شده است. ملاک سنجش عملکرد هر مدل برروی داده‌های ارزیابی از رابطه ۲۶ محاسبه شده است که در آن $y$ خروجی سیستم و $\hat{y}$ خروجی مدل می‌باشد در جدول ۲ نمایش داده شده است.

$$fit\,(\%) = 100\left(1 - \frac{\|y - \hat{y}\|}{\|y - y_{mean}\|}\right) \qquad (۲۶)$$

1. Multi-Resolution

پژوهش نفت شماره ۱۲۵، مهر و آبان ۱۴۰۱، صفحه ۱۶۱-۱۴۵




**شکل ۵** شبکه عصبی موجک

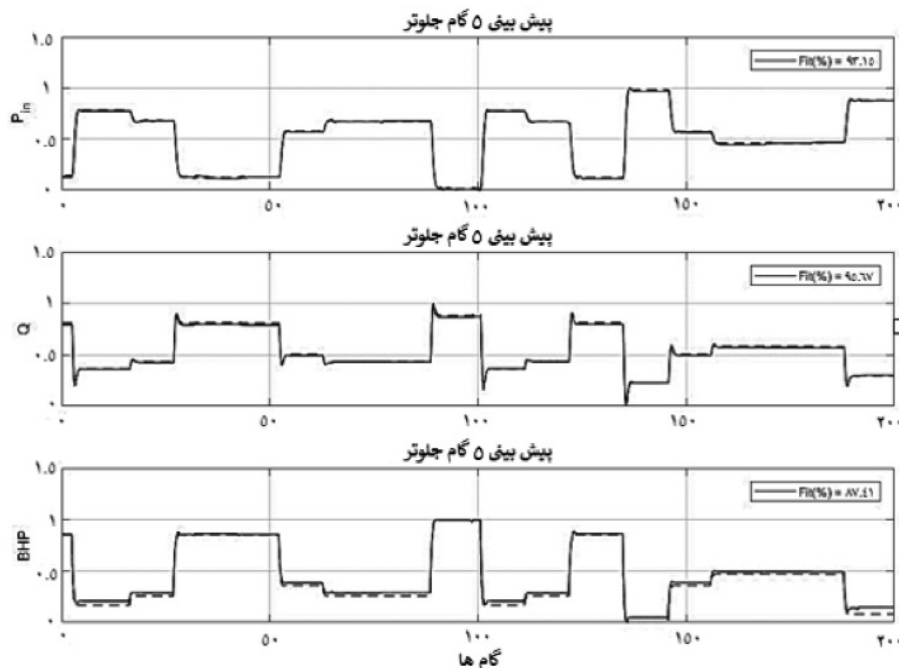
**جدول ۱** نتیجه مدل‌های تخمین زده شده

| مدل | $Q$ | $P_{In}$ | $BHP$ |
|---|---|---|---|
| رگرسورها $[n_a^1, n_a^2, n_b, n_k]$ | [۴,۴,۲,۱] | [۳,۲,۳,۱] | [۴,۲,۳,۱] |
| تعداد نورون‌ها | ۱۲ | ۱۰ | ۱۸ |
| درصد هم‌خوانی (Fit) (داده آموزش) | ۹۷/۱۲ | ۹۶/۳۵ | ۹۲/۵۶ |
| درصد هم‌خوانی (Fit) (داده ارزیابی) | ۹۶/۷۴ | ۹۵/۱۲ | ۹۰/۳۲ |
| درصد هم‌خوانی (Fit) (پیش‌بینی ۵ گام جلوتر) | ۹۵/۶۷ | ۹۳/۱۵ | ۸۷/۴۱ |

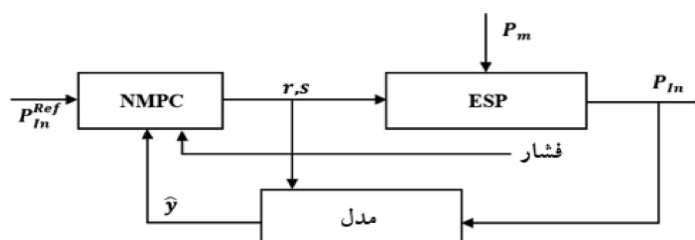
**جدول ۲** مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی چاه ۸۸

| پارامتر | | مقدار | واحد |
|---|---|---|---|
| g | ثابت گرانش | ۹/۸۱ | $m.s^{-2}$ |
| $C_v$ | ضریب شیر | ۲×۱۰<sup>-۵</sup> | - |
| A | سطح مقطع لوله تولیدی | ۰/۰۰۸۱۰۷ | $m^2$ |
| D | قطر لوله تولیدی پایین دست پمپ | ۰/۱۰۱۶ | m |
| H | عمق عمودی کلی چاه | ۲۴۰۰ | m |
| L1 | طول کلی لوله تولیدی از بخش تولید تا پمپ | ۱۱۰ | m |
| L2 | طول کلی لوله تولیدی از پمپ تا سرچاه | ۲۲۹۰ | m |
| V1 | حجم لوله تولیدی پایین دست پمپ | ۰/۸۹ | $m^3$ |
| V2 | حجم لوله تولیدی بالا دست پمپ | ۱۸/۵۶ | $m^3$ |
| ρ | چگالی سیال تولیدی | ۸۵۰ | $Kg.m^{-3}$ |
| $P_r$ | فشار متوسط مخزن | ۲۵۹ | bar |
| PI | شاخص تولید چاه | ۷/۱۴ | $m^3.d^{-1}.bar^{-1}$ |
| μ | ویسکوزیته سیال تولیدی | ۲۵ | cP |
| $P_m$ | فشار متوسط چندراهه | ۲۵/۲ | bar |

جهت ارزیابی مدل، عملکرد مدل‌های تخمین زده شده برروی داده‌های ارزیابی و برای پیش‌بینی ۵ گام جلوتر سنجیده شد که نتایج حاصل در شکل ۶ نشان‌دهنده عملکرد بسیار عالی مدل تخمین زده شده برای پیش‌بینی رفتار سیستم در کنترل‌کننده می‌باشد. پس از طراحی مدل غیرخطی از فرآیند فرازآوری، مرحله بعدی استفاده از مدل تخمین زده شده در کنترل‌کننده و ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده در کنترل مجموعه فرازآوری است. در سناریو در نظر گرفته شده، عملکرد سیستم کنترل طراحی شده برای پمپ نصب شده در چاه شماره ۸۸ تحت تغییرات متعدد مقدار مرجع فشار ورودی پمپ (پیروی از سیگنال مرجع) و تغییرات فشار پایین دست چاه (جبران اغتشاش) بررسی و تست می‌شود. هدف کنترلی مطابق موارد مطرح شده در بخش‌های قبلی نگهداری فشار ورودی پمپ مطابق یک رفتار مرجع و جلوگیری از اثرگذاری اغتشاشات برروی عملکرد پمپ است به گونه‌ای که محدودیت‌های عملیاتی و ایمنی مجموعه فرازآوری رعایت شوند. جهت بررسی بهتر عملکرد سیستم کنترل، از یک مولد سیگنال شبه تصادفی برای تولید سیگنال مرجع و اغتشاشات فشار پایین دست چاه استفاده شده است تا دامنه، بازه زمانی و زمان تغییرات به‌صورت تصادفی تعیین شوند. دیاگرام بلوکی سیستم کنترل در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این مرحله از طراحی کنترل‌کننده لازم است پارامترهای تنظیمی کنترل‌کننده NMPC شامل مقادیر افق پیش‌بینی، افق کنترل و ضرایب جریمه مشخص شوند.

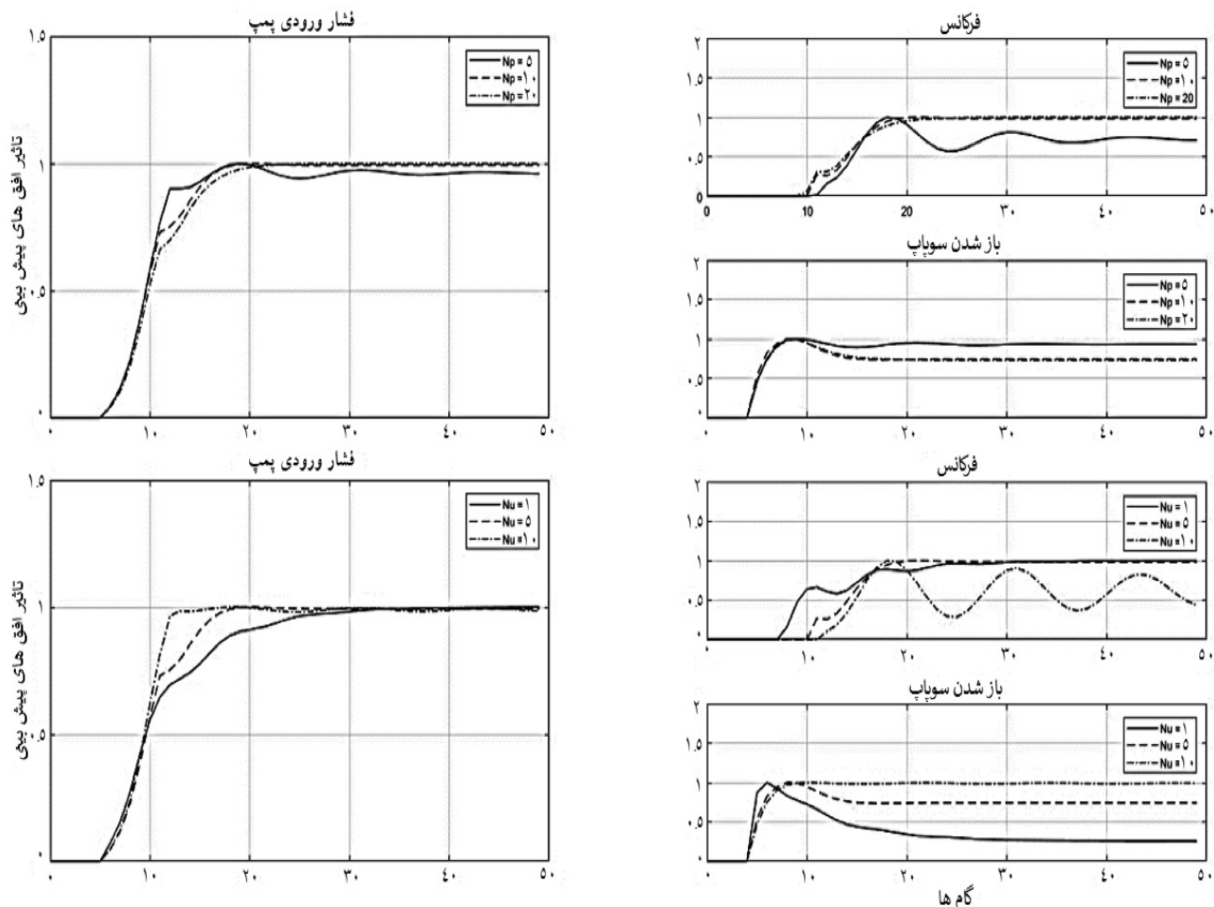



**شکل ۶** عملکرد مدل‌های تخمین زده شده برای پیش‌بینی ۵ گام جلوتر

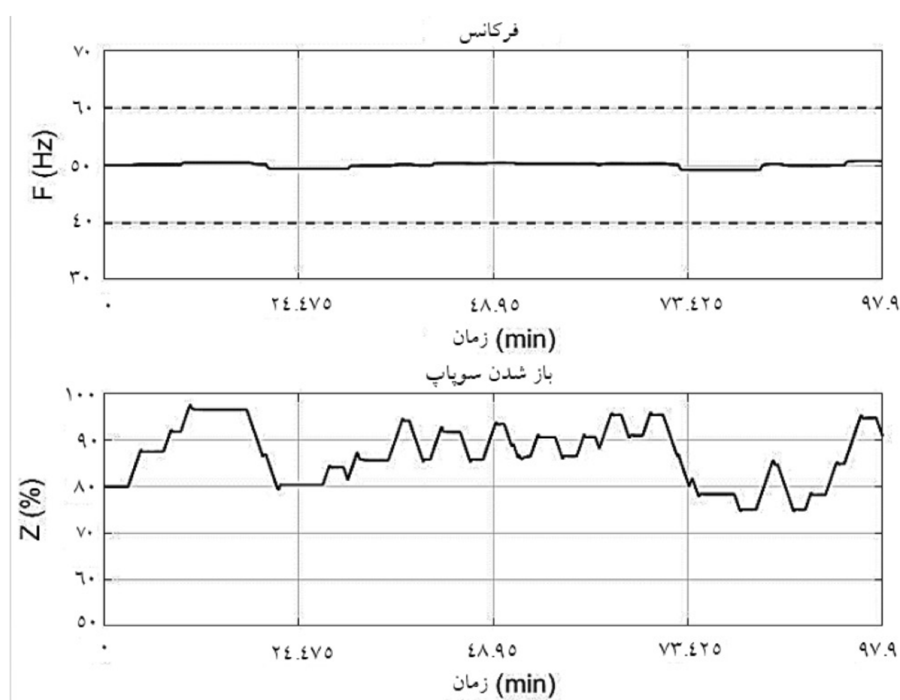



**شکل ۷** دیاگرام بلوکی سیستم کنترل پیشنهادی

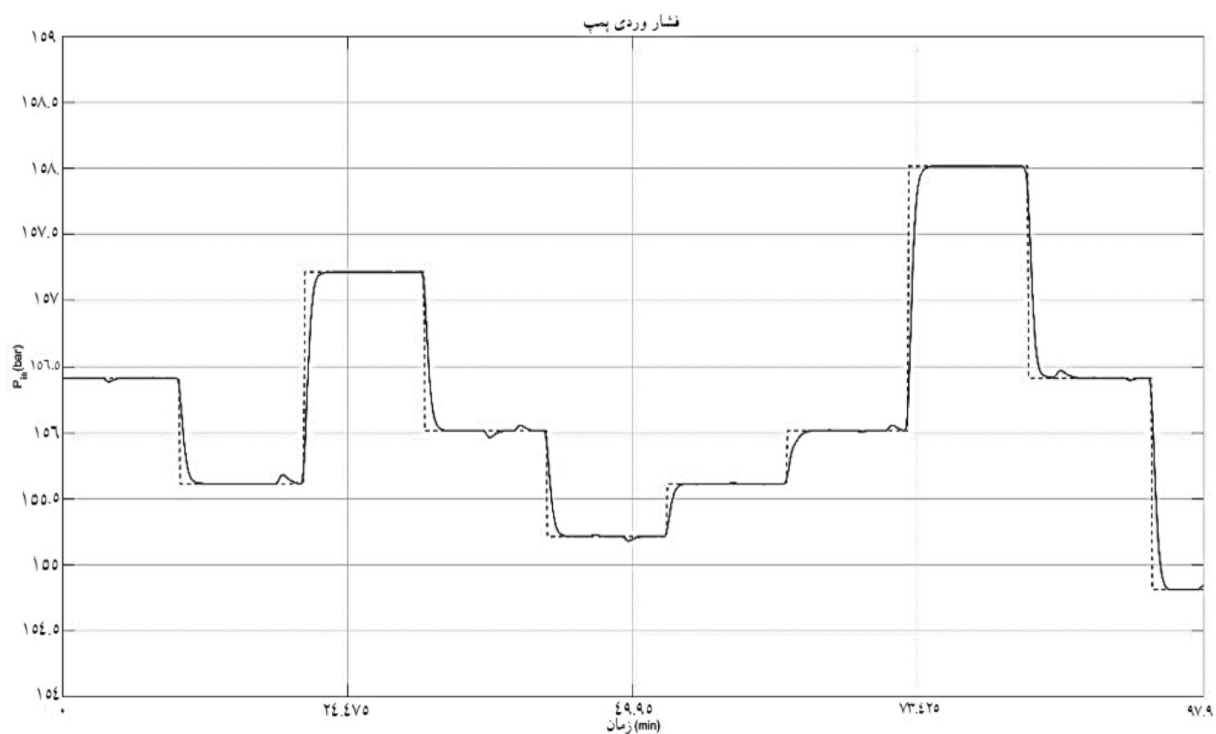
به‌طور معمول، مقدار افق پیش‌بینی را به گونه‌ای تعیین می‌کنند که کل بازه پاسخ گذرا سیستم را شامل شود درحالی‌که کران پایین افق پیش‌بینی باید از زمان تاخیر پاسخ سیستم بیشتر باشد. افق کنترل نیز باید به گونه ای انتخاب شود که زمان کافی برای اعمال سیگنال کنترلی جهت رساندن مقادیر کنترل شده به مقدار مرجع را بدون نیاز به عمل کنترلی شدید به سیستم ارائه دهد. مقادیر بزرگ‌تر افق کنترل عملکرد کنترل‌کننده بهبود می‌بخشد اما از طرف دیگر بار محاسباتی نیز به‌شدت افزایش پیدا می‌کند. تأثیر انتخاب مقادیر مختلف برای افق کنترل و افق پیش‌بینی در عملکرد کنترل‌کننده در شکل ۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود انتخاب مقادیر بزرگ‌تر افق پیش‌بینی سبب افزایش پایداری سیستم، کاهش خطای حالت ماندگار می‌شود. از طرف دیگر با افزایش افق کنترل گرچه سرعت پاسخ‌گویی سیستم افزایش می‌یابد اما عمل کنترلی نوسانی و ناپایدار شده که مطلوب نیست. با توضیحات بالا و انجام سعی و خطا در طراحی کنترل‌کننده افق پیش‌بین ۱۰ و افق کنترل با طول ۳ در نظر گرفته شد. همچنین به‌منظور جلوگیری از اثرگذاری واحد کمیت‌ها برروی تصمیم گیری کنترل‌کننده و مسئله بهینه‌سازی تمامی ورودی و خروجی‌های کنترل‌کننده به بازه یکسان $[-1,1]$ تبدیل شدند. از آنجا که پیروی از فشار ورودی مرجع از اهمیت بیشتری نسبت به کاهش مصرف انرژی برخوردار است، ضریب جریمه انحراف از مقدار مرجع ($\lambda_1$) ۱۰ برابر ضریب جریمه مصرف انرژی ($\lambda_2$) انتخاب شده است. نتیجه پیاده‌سازی کنترل‌کننده برروی مجموعه فرازآوری چاه شماره ۸۸ با مشخصات مطرح شده و سناریو تعریف شده در شکل‌های ۱۲-۹ نمایش داده شده است.



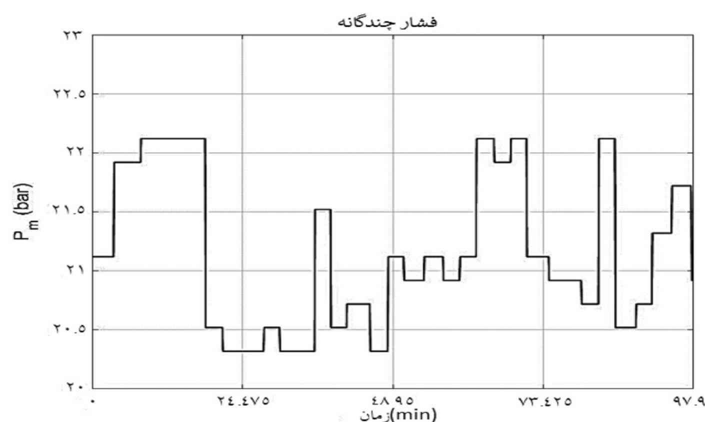

**شکل ۸** اثر افق پیش‌بینی و افق کنترل بر عملکرد سیستم کنترل



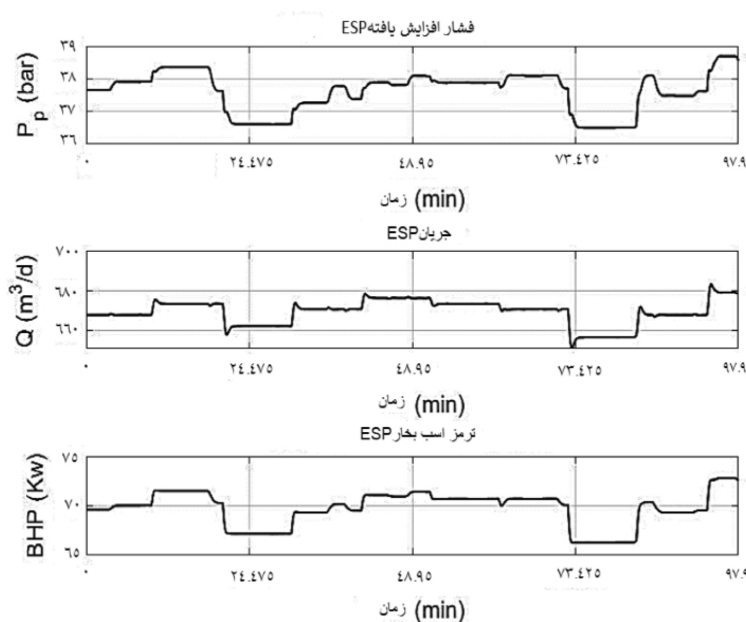

**شکل ۹** خروجی کنترل‌کننده NMPC




**شکل ۱۰** رفتار سیستم تحت کنترل NMPC



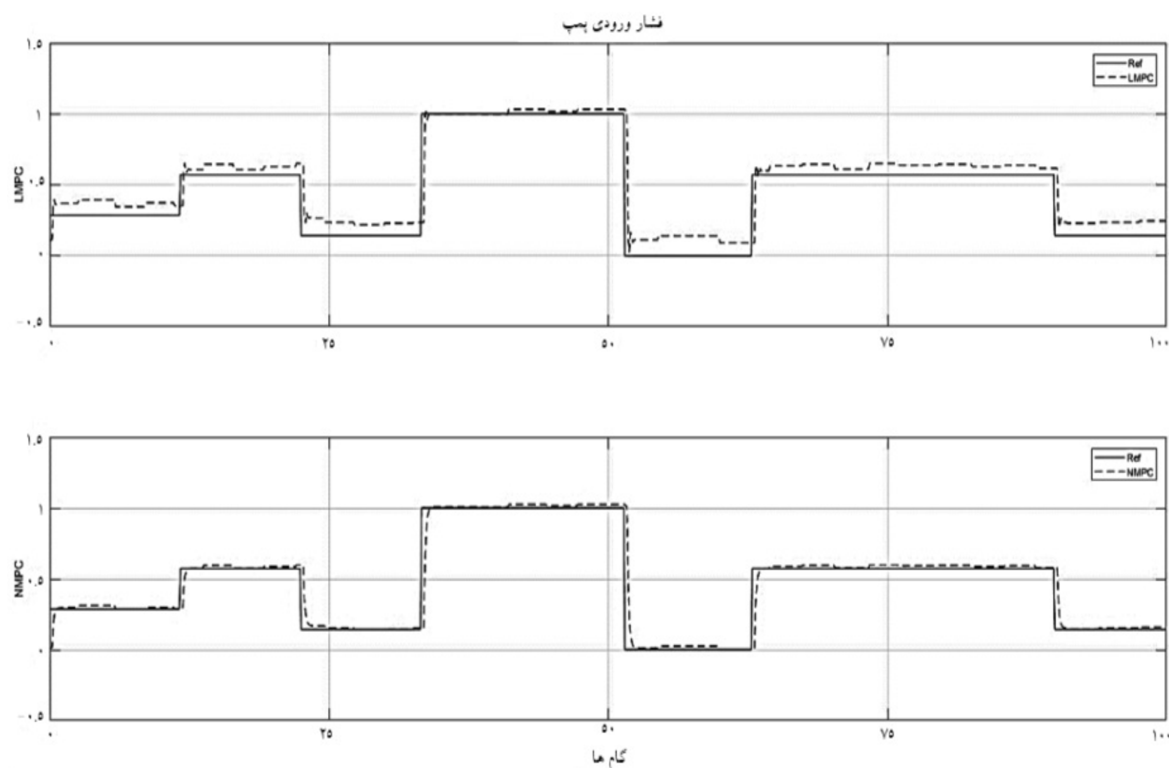
**شکل ۱۱** تغییرات فشار سرچاهی



**شکل ۱۲** هد تولیدی، دبی خروجی و توان مصرفی پمپ

همان‌طور که مشخص است کنترل‌کننده تغییرات مرجع را به‌خوبی دنبال می‌کند. به‌علت استفاده از مدل و کنترل‌کننده غیرخطی، حتی با وجود تغییرات با دامنه بزرگ در سیگنال مرجع ، سیستم کنترل قادر به پیروی از رفتار مطلوب بوده و به سرعت اغتشاشات را جبران کرده است. این درحالی است که کنترل‌کننده NMPC هیچ یک از محدودیت‌های تعریف شده را نقض نکرده و پمپ در محدوده عملیاتی مناسب خود باقی‌مانده است. همچنین، تغییرات سرعت چرخش پمپ بسیار نرم بوده و شیر سرچاهی نیز تا جای ممکن باز نگه داشته شده است. از طرف دیگر، هد تولیدی پمپ در بازه مجاز طراحی باقی‌مانده است. همچنین به‌علت استفاده از مدل NARX مبتنی بر شبکه عصبی بار محاسباتی کنترل‌کننده کاهش یافته است. در ادامه به‌منظور مقایسه، عملکرد سیستم کنترل NMPC توسعه داده شده با سیستم کنترل پیشبین خطی (LMPC) مقایسه شد. در طراحی کنترل‌کننده خطی از مدل خطی ARX با رگرسورهای تعیین شده توسط برنامه شناسایی سیستم نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. انتخاب رگرسورها براساس انتخاب بهترین مدل با کمترین میزان خطای پیش‌بینی

صورت گرفته است. تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده LMPC نیز به‌کمک برنامه MPC Designer نرم‌افزار MATLAB صورت گرفت. عملکرد کنترل‌کننده LMPC طراحی شده در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت به‌علت استفاده از تخمین خطی و تفاوت مدل تخمین زده شده با فرآیند تحت بررسی (Mismatch) در خروجی سیستم خطای ثابتی نسبت به مدار مرجع وجود دارد. همچنین سیستم کنترل نمی‌تواند به‌طور کامل اغتشاشات ورودی به فرآیند را جبران‌سازی کند. این درحالی است که سیستم کنترل NMPC به‌علت استفاده از مدل غیرخطی به‌خوبی رفتار مطلوب را دنبال کرده و اثرات اغتشاشات ورودی به سیستم را سریعاً جبران‌سازی می‌کند.




**شکل ۱۳** مقایسه عملکرد کنترل‌کننده NMPC و LMPC

## نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم کنترل پیشبین غیرخطی مبتنی بر مدل برای مجموعه فرازآوری با پمپ الکتریکی درون‌چاهی طراحی و توسعه داده شد. به‌منظور کاهش بار محاسباتی کنترل‌کننده، مدل دینامیک غیرخطی مبتنی بر رگرسورهای مدل NARX و شبکه عصبی Wavenet به‌عنوان مدل تخمین زننده در ساختار NMPC طراحی شد. جهت بررسی عملکرد کنترل‌کننده در پیروی از رفتار مرجع و جبران اغتشاشات، عملکرد کنترل‌کننده برروی مجموعه فرازآوری چاه شماره ۸۸ میدان اهواز آسماری شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که کنترل‌کننده طراحی شده به‌خوبی تغییرات سیگنال مرجع را دنبال می‌کند، اغتشاشات ورودی به مجموعه فرازآوری به‌سرعت جبران شده و در عین حال محدودیت‌های ایمنی و عملیاتی مجموعه فرازآوری با پمپ ESP نقض نشده‌اند.

## علائم و نشانه‌ها

$A$ : سطح مقطع مسیر تولید (m2)

$BHP$: توان مصرفی پمپ (kW)

$C_Q, C_H, C_\eta$: ضرایب تصحیح گرانروی

$F$ : تلفات فشار ناشی از اصطکاک (bar)

$J$: شاخص تولید ($m^{-3}.s^{-1}.bar^{-1}$)

$M$: پارامتر اینرسی سیال

$P_{bh}$: فشار کف چاه (bar)

$P_{In}$: فشار ورودی پمپ (bar)

$P_r$: فشار متوسط مخزن (bar)

$P_m$: فشار پایین دست چاه (bar)

$P_{wh}$: فشار سرچاه (bar)

$\Delta P_{ESP}$: هد تولیدی پمپ (bar)

$Q_c$: دبی عبوری از شیر سرچاهی ($m^3.s^{-1}$)

$Q_r$: دبی تولیدی مخزن ($m^3.s^{-1}$)

$r$: سرعت چرخش پمپ (Hz)

$S$: بازشدگی شیر سرچاهی (٪)

$Z$: عمق (m)

## حروف یونانی

$\beta$: مدولوس حجم سیال

$\mu$: گرانروی سیال (cP)

$\lambda_1, \lambda_2$: ضرایب جریمه

$\rho$: چگالی سیال ($kg.m^{-3}$)

$v$: سرعت سیال ($m.s^{-1}$)

## مراجع

[1]. Takacs G, (2017) Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance, Gulf Professional Publishing.
[2]. Wilson B L, Liu J C (1985) Electrical submersible pump performance using variable speed drives, in SPE Production Operations Symposium, Society of Petroleum Engineers: Oklahoma City, Oklahoma, 7.
[3]. Divine D L (1979) A Variable Speed Submersible Pumping System, in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers: Las Vegas, Nevada, 12.
[3]. Patterson M M, (2013) On the efficiency of electrical submersible pumps equipped with variable frequency drives: a field study, SPE Production and Facilities, 11: 61-64.
[5]. Al-Jasmi A, Nasr H, Goel H, Moricca G, Carvajal G, Dhar J, Querales M, Villamizar M, Cullick A, Rodriguez J (2013) ESP Smart Flow integrates quality and control data for diagnostics and optimization in real time (Part of KwIDF Project). In SPE Middle East Intelligent Energy Conference and Exhibition, OnePetro, SPE Digital Energy Conference.
[6]. Pavlov A, Krishnamoorthy D, Fjalestad K, Aske E, Fredriksen M (2014) Modelling and model predictive control of oil wells with Electric Submersible Pumps, IEEE Conference on Control Applications (CCA): 586-592.
[7]. Sharma R, Glemmestad B (2013) Optimal control strategies with nonlinear optimization for an Electric Submersible Pump lifted oil field, Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin, 34: 55-67.
[8].Binder B, Kufoalor D, Pavlov A, and Johansen T, (2014), Embedded model predictive control for an electric submersible pump on a programmable logic controller, IEEE Conference on Control Applications, CCA, 5, 2: 579-585.
[9]. Krishnamoorthy D, Bergheim E M, Pavlov A, Fredriksen M, and Fjalestad K, (2016) Modelling and robustness analysis of model predictive control for electrical submersible pump lifted heavy oil wells, IFAC-PapersOnLine, 49, 7: 544-549.
[10]. Delou P, Azevedo J, Krishnamoorthy D, de Souza Jr M, and Secchi A (2019) Model predictive control with adaptive strategy applied to an electric submersible pump in a subsea environment, IFAC-Papers on Line, 52, 3: 784-789.
[11]. Ohrem S J, Holden C (2017) Modeling and nonlinear model predictive control of a subsea pump station, IFAC, 50, 2: 121-126.
[12]. Allgöwer F, Findeisen R, Nagy Z K (2004) Nonlinear model predictive control: From theory to application, Institur of Chemical Engineers, 35, 3: 299-315.
[13]. Grüne L, Pannek J (2011) Nonlinear Model Predictive Control, Nonlinear Model Predictive Control: Theory and Algorithms, 235.
[14]. Schoukens J and Ljung L, (2019), Nonlinear system identification: A user-oriented road map, IEEE Control Systems Magazine, 39, 6: 28-99.

[15]. Nelles O (2002) Nonlinear system identification, from classical approaches to neural networks, fuzzy models, and gaussian processes, Second edition, Oliver Nelles, Springer, 1-711.
[16]. Binder B, Pavlov A, Johansen T (2015) Estimation of flow rate and viscosity in a well with an electric submersible pump using moving horizon estimation, IFAC, 48: 140-146.
[17]. Kaasa G O, Stamnes Ø N, Aamo O M, Imsland L S (2012) Simplified hydraulics model used for intelligent estimation of downhole pressure for a managed-pressure-drilling control system, SPE Drilling and Completion, 27, 01: 127-138.
[18]. Pavlov A, Alstad V (2010) Modelling, simulation and automatic control of ESP lifted wells, Statoil ASA, Norway, Technical Report, 4, 5: 35-48.
[19]. Sardjono P, Saputra M N W (2016) Optimal bottomhole pressure control on oil well production using PID-linear hybrid control on electric submersible pump, 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 1-6.
[20].Guo B (2011) Petroleum production engineering, a computer-assisted approach, 1st edition, Elsevier, 1-458.
[21]. White F M (2011) Fluid Mechanics, 7th edition, Mc Graw Hill, 1-176.
[22].Turzo Z, Takacs G, Zsuga J (2000) Equations correct centrifugal pump curves for viscosity, Oil and Gas Journal, 98, 22: 57-57.
[23]. Drive A (2007) Flow Equations for Sizing Control Valves, Standards and Recommended Practices for Instrumentation and Control, ANSI/ISA, 1-69.
[24]. Zhang J, Walter G G, Miao Y, Lee W N W (1995) Wavelet neural networks for function learning, IEEE transactions on Signal Processing, 43, 6: 1485-1497.
[25]. Bakshi B R, Stephanopoulos G (1993) Wave-net: a multiresolution, hierarchical neural network with localized learning, AIChE Journal, 39, 1: 57-81.

# راهنمای تهیه مقالات برای چاپ در مجله پژوهش نفت

مجله پژوهش نفت، مقالات علمی و پژوهشی در زمینه‌های مرتبط با صنایع نفت، گاز و پتروشیمی را برای چاپ می‌پذیرد. از پژوهشگران و کارشناسان گرامی که مایل به ارسال مقالات خود هستند، خواهشمندیم به موارد ذیل توجه فرمایند:

مقاله را از طریق وب سایت مجله به آدرس journals.ripi.ir و یا وب سایت پژوهشگاه صنعت نفت به آدرس www.ripi.ir با ثبت نام در سامانه الکترونیکی مجله ارسال نمایید.

مسؤولیت کامل مطالب و منابع چاپ شده بر عهده نویسنده یا نویسندگان خواهد بود و نسخه نهایی مقاله پیش از چاپ به امضاء نویسنده یا نویسندگان می‌رسد. نویسنده یا نویسندگان متعهد خواهند شد که مقالات ارسالی در نشریه دیگری انتشار نیافته است. **(فرم تعهد با امضاء تمام نویسندگان ارسال گردد.)**

مقالات ارسالی عودت داده نمی‌شود.

آئین نگارش فارسی باید به طور کامل رعایت شود و از به‌کار بردن اصطلاحات خارجی که معادل دقیق و پذیرفته شده در زبان فارسی دارند، خودداری شود.

مقاله باید بر روی کاغذ سفید (A4) به صورت یک خط در میان (فاصله سطرها ۱/۲ سانتی متر) توسط نرم افزار Microsoft Word ویرایش ۲۰۰۷ یا ماقبل آن تایپ و حاشیه بالا و پایین ۲/۵ سانتی متر، حاشیه چپ و راست ۲/۵ سانتی متر، لبه بالا ۲/۵ سانتی متر و لبه پایین ۱/۲۷ سانتی متر تنظیم شود.

مقاله باید شامل بخش‌های زیر باشد:

**۱. عنوان:** باید تا حد امکان کوتاه و کاملاً گویای موضوع مقاله باشد.

نام نویسنده یا نویسندگان باید پس از عنوان مقاله ذکر شود. نویسنده طرف مکاتبات باید با علامت * در کنار نام خود مشخص گردد.

عنوان و آدرس نویسنده یا نویسندگان و پست الکترونیکی نویسنده طرف مکاتبات مشخص شود.

**۲. چکیده:** باید بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ کلمه و شامل هدف از تحقیق، روش کار، مهم‌ترین یافته‌ها و نتیجه‌گیری باشد.

**۳. واژه‌های کلیدی:** شامل ۳ الی ۶ واژه کلیدی که نکات اصلی در مقاله را معرفی می‌کند.

**۴. مقدمه:** مقدمه ضمن بیان هدف تحقیق، باید حاوی خلاصه‌ای از اهمیت موضوع، نتایج مطالعات و مشاهدات مرتبط با تحقیق مورد نظر که در گذشته انجام شده است، با ذکر منابع و ماخذهای لازم آن‌ها باشد.

**۵. روش کار:** در این بخش لازم است روش‌های آزمایشگاهی و مواد مصرفی و تجهیزات مورد استفاده به طور کامل معرفی شود. همچنین چگونگی و روش نمونه‌گیری با دقت بیان شود و آزمون‌های آماری مورد استفاده و مراحل استنتاج آماری به خوبی تشریح گردد.

**۶. نتایج و بحث:** در برگیرنده نتایج حاصل از تحقیق به صورت متن، جدول، نمودار و تصویر و بحث در خصوص علل پدیده‌ها و مقایسه با یافته‌های مرتبط است.

**۷. نتیجه‌گیری:** در این بخش یافته‌های حاصل از تحقیق به صورت مختصر و شفاف ارائه می‌گردد.

**۸. تشکر و قدردانی:** در صورت لزوم از همکاری سازمان‌ها می‌شود.

**۹. علائم و نشانه‌ها:** فهرست علائم و نشانه‌های مورد استفاده در مقاله به ترتیب حروف الفبا به همراه واحد و شرح آن‌ها ارائه می‌شوند.

**۱۰. مراجع:** کلیه مراجع مورد استفاده به ترتیب ارجاع آن‌ها در متن، در این بخش ارائه می‌گردند.

**۱۱. عنوان، چکیده و واژه‌های کلیدی انگلیسی:** این بخش باید در صفحه‌ای جداگانه ارائه شود. تطبیق عنوان و چکیده فارسی با انگلیسی باید مورد توجه قرار گیرد. کلیه نکات مندرج در بند ۱، در ترجمه انگلیسی آن نیز رعایت می‌شود.

لطفاً در تنظیم مقالات، نکات زیر را رعایت فرمایید:

عنوان اصلی مقاله با قلم BZar شماره ۲۴ ضخیم تایپ شود.

عناوین اصلی داخل مقاله با قلم BNazanin شماره ۱۴ ضخیم و عناوین فرعی با قلم BNazanin شماره ۱۲ ضخیم تایپ شوند.

هر تیتر از متن قبلی خود با یک خط فاصله جدا شود.

متن فارسی مقاله با قلم BNazanin شماره ۱۲/۵ نازک و واژه‌ها و متن انگلیسی با قلم Times New Roman شماره ۱۰ نازک تایپ شود.

عنوان جداول و شکل‌ها با قلم BNazanin شماره ۱۱ ضخیم تایپ گردد. عنوان جداول در بالا و عنوان شکل‌ها در پایین آن‌ها نوشته می‌شود.

محتوای فارسی جداول با قلم BNazanin شماره ۱۱ نازک و عبارات انگلیسی جداول با قلم Times New Roman شماره ۹ نازک تایپ شود.

کلیه اعداد باید به‌صورت فارسی تایپ شوند.

واحد تمامی اعداد باید در سیستم SI باشد.

کلیه فرمول‌ها باید به ترتیب شماره‌گذاری شده و با استفاده از نرم‌افزار MathType تهیه شوند.

کلیه جداول و شکل‌ها در انتهای مقاله ارائه گردد. هر جدول یا شکل در یک صفحه جداگانه ارائه شود. همچنین فایل اصلی مقاله شامل متن اصلی، چکیده فارسی و لاتین، جداول و تصاویر (بدون نام نویسندگان) نیز ارسال گردد.

کلیه جداول فارسی و راست چین باشد.

کلیه شکل‌ها باید به‌صورت سیاه و سفید و کاملاً واضح ارائه شوند.

از تکرار داده‌ها به صورت چندگانه (جدول و نمودار و ...) خودداری فرمایید.

اگر شکل یا جدولی از مرجع دیگر اخذ شده باشد، شماره مرجع در انتهای عنوان شکل یا جدول درج و مشخصات آن به منابع اضافه شود.

شکل‌های مقالات به صورت فایل اصلی (در همان نرم‌افزاری که توسط آن تهیه شده‌اند مانند Excel و غیره) ارسال شود.

از به‌کار بردن واژه‌های انگلیسی در متن مقاله خودداری شود. معادل انگلیسی کلمات فارسی و نام نویسنده (گان) که برای نخستین بار در مقاله به‌کار می‌رود، به صورت زیرنویس در صفحه مربوط درج گردد. زیرنویس‌ها در هر صفحه با گذاردن شماره فارسی در گوشه بالای آخرین حرف از کلمه، در متن مشخص شوند.

در بخش چکیده نباید ارجاعی به معادلات و یا مراجع مقاله داده شود.

کلیه مراجع ذکر شده در بخش مراجع باید در متن مقاله مورد ارجاع قرار گرفته باشند. شماره‌گذاری مراجع در متن در داخل کروشه صورت می‌گیرد.

-تعداد صفحات مقاله به صورت خام (بدون قالب‌بندی) حداکثر ۱۵ صفحه تهیه گردد.

ارائه مراجع بر اساس الگوی زیر صورت می‌گیرد:

-کتاب و گزارش فارسی و خارجی:

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال انتشار) نام کتاب، ذکر نام فصل یا فصل‌های کتاب (درصورت مطالعه و استفاده از یک یا چند فصل کتاب)، نام کتاب، شماره ویرایش کتاب، ناشر، شماره صفحات.

**مثال**:

1. Barrow GM (1984) Physical chemistry, (4th ed.), McGraw-Hill Inc., 1-127.

2. Spellman FR (2010) Problems facing water and wastewater treatment, Spellman's standard handbook for wastewater operators, 1st ed., Crc Press, 9-32.

3. Spellman FR (2010) Problems facing water and wastewater treatment (Chapter 1), Spellman's standard handbook for wastewater operators, 1st ed., Crc Press, 9-32.

**-مقاله فارسی**:

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال) عنوان مقاله، نام مجله به طور کامل، دوره مجله، شماره مجله: شماره صفحات.

**مثال‌ها:**

۴. صفایی م.، قاسمی م. ر. و میرحبیبی ع. (۱۳۸۴) ساخت و بررسی ریز ساختاری پایه‌های کاتالیستی کلسیم آلومینات، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، ۲۴، ۲: صفحات ۱۸ - ۹.

۵. زینل‌زاده ا.، رضایی م. ر. و کمالی م ر (۱۳۹۲) استفاده از مدلسازی یک بعدی حوضه در مطالعه سیستم نفتی: مثالی از سنگ‌های منشا کژدمی و پابده در جنوب فروافتادگی دزفول، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۲۹: ۱۱۹-۱۰۷.

- مقاله خارجی: نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال انتشار) عنوان مقاله، نام کامل مجله، دوره مجله، شماره مجله: شماره صفحات.

**مثال‌ها:**

6. Wang L, Sunden B (2003) Optimal design of plate heat exchangers with and without pressure drop specifications, Applied Thermal Engineering, 23: 295-311.

7. Qiu Z, Zou C (2020) Controlling factors on the formation and distribution of "sweet-spot areas" of marine gas shales in South China and a preliminary discussion on unconventional petroleum sedimentology, Journal of Asian Earth Sciences,

194, 1: 103989-103992.

8. Soltani B, Beiranvand B, Moussavi-Harami R, Honarmand J, Taati F (2020) Facies analysis and depositional setting of the upper pliocene akchagyl formation in southeastern caspian basin, NE Iran, Carbonates and Evaporites, 35, 8: 1-18.

9. Rögl F (1999) Mediterranean and Paratethys, Facts and hypothesis of an Oligocene to Miocene paleogeography (short review), Geologica Carpathica, 50, 4: 339-349.

10. Robert Alexandra MM, Letouzey J, Kavoosi MA, Sherkati S (2014) Structural evolution of the Kopeh Dagh fold-and-thrust belt (NE Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin, Marine and Petroleum Geology, Elsevier, 57: 68–87.

**- مجموعه مقالات کنفرانس‌ها:**

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال برگزاری کنفرانس) عنوان مقاله، عنوان کنفرانس، محل برگزاری کنفرانس، شماره صفحات.

**مثال:**

۱۱. شکری قلعه س.، زرین پاشنه س. و سلطانیه م. (۱۳۷۹) مدل‌سازی و شبیه‌سازی راکتورهای چند فازی برای گوگردزدایی از سوخت دیزل، پنجمین کنگره ملی و چهارمین کنگره بین‌المللی مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، ایران.

12. Al-Thani J, Faisal F, Tony M (2005) Risk and uncertainty modeling in the oil and gas industry, Middle East Oil and Gas Show and Conference, Society of Petroleum Engineers (SPE), Bahrain.

**- مقاله حاصل از کتب:**

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان مقاله )سال انتشار(، عنوان مقاله، عنوان کتاب، ناشر، شماره صفحات.

13. Lee DH, Kim HI, Kim SS (2004) Surface modification of polymeric membranes by UV grafting, Advanced materials for membrane separations, American Chemical Society, 281-299.

**- کتب:**

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان مقاله )سال انتشار(،عنوان کتاب، ناشر، شماره صفحات.

۱۴. آقانباتی ع. (۱۳۸۳) انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶-۱.

**- پایان‌نامه: نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده (سال) عنوان پایان‌نامه، نوع پایان‌نامه، دانشگاه، کشور، شماره صفحات (در صورت امکان).**

**مثال:**

۱۵. ابراهیمی ه (۱۳۸۳) مدل‌سازی راکتورهای ریفرمینگ متان توسط بخار آب از نوع حرارت از بالا، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند، ایران، ۷۱-۱.

۱۶. نبوی ج. (۱۳۸۳) گوگردزدایی بیولوژیکی زغال سنگ طبس، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، ۴۸-۱۳.

**-پایان‌نامه چاپ‌شده به زبان انگلیسی:**

Author(s) (year) Title, Degree level, University/Institute, location, pp. .

17. Mack S. (2000) Desperate optimism, MA thesis, University of Calgary, Canada, 1-82.

**- ثبت اختراع: نام خانوادگی حرف اول نام مخترع یا مخترعان (سال) عنوان اختراع، نوع و شماره ثبت اختراع.**

**مثال:**

18. Baker F S (1998) Highly microporous carbon, U.S. Patent: 5710092.

**.منابع اینترنتی: نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال) عنوان، آدرس سایت -**

**مثال:**

19. Arps J, Lanning B, Dearnaley G (2007) Maximizing a potentially significant energy source, http://www.swri.org/3pubs/ttoday/spring06/energy.html.

**توجه**: در بخش مراجع (References) به هیچ وجه ممکن لغت یا عبارت غیره یا بقیه نویسندگان یا "et al" به‌هیچ وجه ذکر نگردد.

توجه: در بخش مراجع مقاله و بخش چکیده تفصیلی هر مقاله ، خواهشمند است که به تعدادی از مقالات چاپ شده در مجله پژوهش نفت اشاره گردد.

فونت تمامی مراجع که به زبان انگلیسی نگارش می گردد می‌بایست Times New Roman 10 Regular باشد.

در بخش چکیده تفصیلی (Extended Abstract) فونت ها باید به صورت ذیل باشند:

| بخش چکیده تفصیلی (Extended Abstract) | Font size and type |
|---|---|
| موضوع مقاله (Topic) | Times New Roman 14 Regular and Bold |
| نام و نام خانوادگی نویسندگان | Times New Roman 10 Regular and Bold |
| افیلیشن نویسندگان | Times New Roman 9 Regular and Italic |
| ایمیل نویسنده یا نویسندگان مسئول | Times New Roman 9 Regular |
| لغت Abstract | Times New Roman 10 Regular and Bold |
| متن Abstract | Times New Roman 10 Regular |
| لغت Keywords | Times New Roman 10 Italic and Bold |
| لغات Keywords | Times New Roman 10 Regular |
| لغت Introduction | Times New Roman 10 Regular and Bold |
| متن Introduction | Times New Roman 10 Regular |
| لغت Geological settings (در صورت نیاز) | Times New Roman 10 Regular and Bold |
| متن Geological settings (در صورت نیاز) | Times New Roman 10 Regular |
| لغت Materials and methods | Times New Roman 10 Regular and Bold |
| متن Materials and methods | Times New Roman 10 Regular |
| لغت Results and discussion | Times New Roman 10 Regular and Bold |
| متن Results and discussion | Times New Roman 10 Regular |
| لغت Conclusions | Times New Roman 10 Regular and Bold |
| متن Conclusions | Times New Roman 10 Regular |
| لغت Acknowledgment (در صورت نیاز) | Times New Roman 10 Regular and Bold |
| متن Acknowledgment (در صورت نیاز) | Times New Roman 10 Regular |
| لغت Nomenclatures (در صورت نیاز) | Times New Roman 10 Regular and Bold |
| متن Nomenclatures (در صورت نیاز) | Times New Roman 10 Regular |
| لغت References | Times New Roman 10 Regular and Bold |
| متن References | Times New Roman 10 Regular |
| لغت (Appendixes) | Times New Roman 10 Regular and Bold |
| متن (Appendixes) | Times New Roman 10 Regular |
| تعداد صفحات (با در نظر گرفتن شکلها و جداول | Research Article: Maximum 5 pages including figures and tables<br>Review Article: Maximum 9 pages including figures and tables<br>Short communication Article (Research note): Maximum 3 pages including figures and tables |
| لغت Table | Times New Roman 9 Regular and Bold |
| متن بیانکننده جدول | Times New Roman 9 Regular |
| لغات، عبارات، واحدها درون هر سلول از جداول | Times New Roman 9 Regular |
| لغت Fig. | Times New Roman 9 Regular and Bold |
| متن بیان کننده شکل | Times New Roman 9 Regular |
| مراجع درون متن (in-text citations) | ([Times New Roman 10 Regular (e.g. [1], [1,2-5], or [3,7 |

# Nonlinear Model Predictive Controller for Electrical Submersible Pump Lifted Wells

**Farid Aldin Mirzaie Harsini and Mehdi Nazari Sarem***
Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Islamic Azad University, Centre Tehran Branch, Iran
**mah.nazari_sarem@iauctb.ac.ir**
**DOI: 10.22078/PR.2022.4734.3124**

Received: February/07/2022 Accepted: May/01/2022

## Abstract

Artificial lifting utilizing electrical submersible pump is widely used to increase oil production from wells. A suitable control system is required in order to increase efficiency of ESP system and to avoid damage to pump and to increase safety of ESP production. Automatic control of ESP unit is not a trivial task due to the high number of parameters and variable involved. Many methods have been proposed for control of ESP lifted wells. Most methods rely on a linear model of ESP lifted well and controller designed based on this linear approximation. Linear model and controllers can fail if the process undergoes large changes in operating conditions or huge disturbances are introduced to process. Other methods solve dynamic equations governing the ESP lifted well operation. Although these methods are highly accurate; however, they are computationally expensive, and they cannot be implemented on conventional control systems. In this paper, a nonlinear dynamic model is developed for ESP lifted well. The model is then utilized inside a Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) System. The developed model and controller performance is then tested and assessed under various scenarios. The developed controller performance shows proper reference tracking and disturbance rejection properties while the process constraint are completely satisfied.

**Keywords:** Artificial Lifting, Electrical Submersible Pump, Nonlinear Model Predictive Controller, Wavelet Network, Nonlinear Control.

# Optimization of Asphaltenes Separation from Vacuum Distillation Residue using Liquid-Liquid Extraction by Response-surface Method

**Reza Asgari[1], Vahab Ghalehkhondabi[2], Alireza Fazlali[2],* Mahmodreza Nikkholgh[3] and Abdoreza Moghadassi[2]**
1. Process Engineer, Shazand Oil Refinery Co., Arak, Iran
2. Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Arak University, Iran
3. Process Engineer, Exir Pooyan Co., Arak, Iran
**a-fazlali@araku.ac.ir**
**DOI:10.22078/PR.2022.4733.3125**

Received: February/08/2021 Accepted: June/12/2022

## Abstract

This investigation studied the separation of asphaltenes from the vacuum bottom, using industrial solvents such as normal pentane, hexane, and heptane. The central composite design (CCD) as a response surface methodology (RSM) method was applied to optimize the process. The weight percentage of asphaltene and the yield of de-asphalted oil (DAO) had been achieved at 0.447 and 48%, respectively, under optimum economic conditions (normal hexane solvent, solvent to feed ratio of 9.5 mL/g, and extraction temperature of 25 °C). The statistical study indicated that the response surface quadratic model for the mentioned parameters was significant and a perfect correlation between the statistical model and experimental data was found. Furthermore, according to an analysis of variance (ANOVA), the temperature of extraction and the quadratic interaction of the solvent to feed ratio parameter have shown a significant impact on the weight percentage of asphaltene. In general, the results suggest that the introduced approach is an efficient and economical technique to increase residual fluid catalytic cracking unit (RFCC) capacity and production of high-quality bitumen.

**Keywords:** Bitumen, De-asphalted Oil, Industrial Solvents, Optimization, Solvent de-asphalting, Vacuum Bottom.

# Porosity Modeling Using Simultaneously Seismic Attribute and Electrofacies Data in Sarvak Reservoir of an Iranian Oil Field

**Vali Mehdipour[1], Ahmad Reza Rabbani*[1], Ali Kadkhodaie[2]**
1. Faculty of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2. Earth Sciences Department, Faculty of Natural Science, University of Tabriz, Iran
**rabbani@aut.ac.ir**
**DOI:10.22078/PR.2022.4652.3089**

Received: November/14/2021 Accepted: April/30/2022

## Abstract

In this study, 3D model of effective porosity in heterogeneous Sarvak reservoir in one oil filed located in Dezful Embayment has been constructed. Therefore, geostatistics method has been applied for porosity propagation along with using trend maps of seismic attributes as well as seismic cube as secondary variable for Collocated co-kriging. Thus, the different seismic attributes including Attenuation, Envelope, RMS amplitude, Sweetness and Acoustic impedance attributes have been provided. The multiple attribute property has been used for preparing the related trend maps to be used in porosity modeling. Moreover, electrofacies analysis has been done via applying MRGC algorithm in order to control porosity distribution in 3D reservoir model. In this study, we tried to consider the trend maps, electrofacies, and seismic acoustic impedance cube along with applying geostatistics algorithms for 3D porosity propagation. Based on this study, the lower Sarvak has better reservoir quality than the Upper Sarvak due to developing of good reservoir facies. According to this study, the accuracy of the porosity model increases when it is used simultaneously seismic data and electrofacies, resulted in decreasing uncertainty of porosity distribution.

**Keywords:** Heterogeneous, Porosity, Electrofacies, Acoustic Impedance, 3D Model.

# Investigation of the Effects of pH Scale and Ultrasonic Waves on the Stability of Copper Oxide Nanoparticles in the Pool Boiling Process

**Mohsen Khooshehchin[1], Sohrab Fathi[2], Farhad Salimi*[1] and Akbar Mohammadidoust[1]***

1. Department of Chemical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

2. Department of Chemical Engineering, Faculty of Energy, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

**mohammadidoust@iauksh.ac.ir**

**f.salimi@iauksh.ac.ir**

**DOI:10.22078/PR.2022.4710.3114**

Received: January/11/2022 Accepted: July/03/2022

## Abstract

In this study, the effects of pH and ultrasonic waves on the performance and stability of CuO have been studied. The CuO nanofluid (deionized water-based) was used to increase the boiling heat transfer coefficient. Boiling heat transfer coefficient of fluid increased by the addition of nanoparticles into the fluid, but due to the instability of nanoparticles by increasing temperature and time, nanoparticles were precipitated on the heat transfer surface. Therefore, it led to a reduction in the boiling heat transfer coefficient. Moreover, it is necessary to obtain the optimal concentration of nanoparticles in the fluid to determine the minimum amount of deposition. The use of methods to reduce the deposition of nanoparticles such as increasing the stability of nanoparticles and also an optimal concentration made an increase in heat transfer coefficient. To overcome this challenge, two conventional methods were employed including pH change (9.5, 10 and 10.5) and ultrasonic radiation (with 25%, 50%, and 75% of power). The results indicated that the maximum enhancements of boiling heat transfer coefficient were achieved at nanoparticles concentration of 0.125% under ultrasonic radiation with 50% power and the pH value of 10 as average of 37.48% and 22.68%, respectively.

**Keywords:** Nanoparticles, Boiling Heat Transfer Coefficient, Ultrasonic, pH, Sediment.

# Magnesium Chloride Removal by Nanofiltration Membranes Prepared from Cuprous Oxide Nanoparticles

**Shakiba Ghohyei, Abdolreza Moghadassi*, Samaneh Bandehali, Morteza Habibi and Maryam Eskandari**

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Iran

**a-moghadassi@araku.ac.ir**

**s-bandehali@phd.araku.ac.ir**

**DOI:10.22078/PR.2022.4700.3113**

Received: January/10/2022 Accepted: June/13/2022

## Abstract

In this study, $Cu_2O$ nanoparticles were first synthesized electrochemically, and the synthesized nanoparticles were used to modify nanofiltration membranes. Different concentrations of nanoparticles were included as an additive in PES as a membrane matrix for the preparation of PES/$Cu_2O$ nanofiltration membranes. The prepared membranes were analyzed by Fourier transform infrared (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM). FTIR analysis showed the formation of favorable bonds in the synthesized nanoparticles and prepared membranes. The separation performance of membranes was investigated with pure water flux and $MgCl_2$ removal. The results showed the highest pure water flux of 36.78 L/m$^2$h for M1 at 0.05 wt.% $Cu_2O$ nanoparticles. In addition, the $MgCl_2$ rejection increased to 72% at 2 wt.% $Cu_2O$ nanoparticles for M5.

**Keywords:** Membrane, Nanofiltration, Magnesium Chloride Removal, Copper Oxide Nanoparticles, Modification Methods.

Petroleum Research, 2022(October-November), Vol. 32, No. 125

# Microfacies, Sedimentary Environment and Diagenetic Processes Analysis of Ilam Formation in Gachsaran Oil Field, Zagross Basin

**Mehdi Ahmadi Nabi[1], Davoud Jahani[1] and Bahman Soleimani*[2]**
1. Geology Department, Basic Sciences Faculty, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Department of Petroleum Geology and sedimentary Basin, Earth Sciences Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran
**soleimani_b@scu.ac.ir**
**DOI:10.22078/PR.2022.4456.3016**

Received: June/21/2021 Accepted: July/03/2022

## Abstract

The study of sedimentary characteristics of carbonate formations as one of the main hydrocarbon reservoirs is important. In this research paper, we used thin section, and petrophysical logs data to analysis of facies, sedimentary environment and diagenetic variation of the Ilam Formation (Bangestan group). Thin sections petrography revealed that the Ilam Formation which was deposited as a full series in western part of the Gachsaran oil field and characterized by a neritic facies indicating a shallow marine. The sedimentary facies of Ilam Formation are mainly limestone, and sometimes shaley limestone (in restricted part of the basin). The lack of Coniancian-Turonian sediments in wells drilled in eastern part of the field can be related to erosional phase after Cenomanian-Turonian and developement of paleoheight parallel to Khark-Mish fault. The determined facies are deposited over a carbonate platform (shelf type) in three sedimentary environments: shoal, lagoon and semi restricted lagoon. The petrographic characteristics of detected facies of Ilam Formation revealed that they were experienced different diagenetic realms such as marine, meteoric, and burial and during uplift periods. These sediments then influenced by diagenetic processes such as micritization, compaction, cementation, neomorphism, solution, fracturing and replacement (dolomitization, hematitization, and pyritization). The dominant porosity types are interconnected vugs, fracture and channel which are played a profound effects on the variation of reservoir quality. The measurements of petrophysical parameters present that the averages of porosity, water saturation and net to gross ratio are varied in the Ilam reservoir, but these parameters are generally 2.3%, 88% and 0.016, respectively. In view of low values of porosity, the role of fractures and diagenetic processes are important in the reservoir quality. The paleohigh presence in eastern section is not only affected on facies distribution, but it also has an important role in subsequent evolution. Therefore, the quality of the Ilam reservoir is a function of sedimentation, diagenesis, and tectonic activity; and therefore, it will be variable in different parts.

**Keywords:** Gachsaran Field, Ilam Formation, Well Log, Sedimentary Facies, Reservoir Quality.

# Facies Analysis, Diagenesis Processes and Sedimentary Environment of Shurijeh Formation in Khangiran Gas Field

**Zahra Mashayekhi[1], Ali Kadkhodaie[2]*, Ali Solgi[1], Seyed Ahmad Babazadeh[3], Seyed Mohsen Ale Ali[1]**

1. Department of Earth Sciences, Faculty of Convergent Sciences and Technologies, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2. Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Iran

3. Department of Earth Sciences, Faculty of Basic Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran

**kadkhodaie_ali@tabrizu.ac.ir**

**DOI: 10.22078/PR.2022.4650.3090**

Received: November/16/2021 Accepted: May/08/2022

## Abstract

Shurijeh Formation is deposited in Kopeh Dagh sedimentary basin, and it is one of the gas reservoirs in northeastern Iran. Khangiran gas field with a northwest-southeast structure is located in the northeastern part of Khorasan Razavi province. The purpose of this study is to investigate facies, sedimentary environment and diagenetic processes that have been effective on the reservoir quality of Shurijeh Formation in the studied wells. Based on petrographic studies on thin sections of Shurijeh Formation in the studied wells, nine main rock facies including Sandy Conglomerate, Quartz Arenite, Sublitarnite, Subarcose, Quartz Wackes, Claystone/Shale, Nodular Anhydrite, Sandy Dolomudstone and Sandy Dologrenston have been identified that are located in the tidal, river, flood plain and meandering sedimentary zones. Petrographic studies of thin microscopic sections show that diagenetic processes in three marine, meteoric and burial environments have affected the Shurijeh Formation. The primary processes affected in the facies of Shurijeh Formation include cementation, bioturbation, primary dolomitization and anhydrite. Finally, using image log, petrophysical log and combining the results of thin section studies in the key well of Khangiran field, was determined that in most cases there is a good conformity between the results of image log, thin sections and petrophysical log.

**Keywords:** Khangiran Gas Field, Facies, Diagenesis Processes, Sedimentary Environment, Petrophysical Log and Image Log

Petroleum Research, 2022(October-November), Vol. 32, No. 125

# Optimization of Ni/$Al_2O_3$ Catalyst for Dry Methane Reforming Process in Microchannel Reactor

**Seyed Reza Yahyavi and Gholamreza Moradi***

Catalyst Laboratory, Faculty of Petroleum and Petrochemical, Razi University, Kermanshah, Iran

**gmoradi @razi.ac.ir**

**DOI:10.22078/PR.2022.4782.3155**

Received: May/16/2022 Accepted: July/13/2022

## Abstract

Inactivation of Ni catalysts in the dry reforming of methane process has been one of the issues of concern. The use of active and base phase promotors and the synthesis of Ni-CO / $Al_2O_3$-MgO catalysts by impregnation method have been considered in our research. The main focus of this study is to evaluate the effect of addition of the promotors on the performance of synthesized catalysts in wall-coated microchannel reactor. XRD, BET and FESEM analyzes have been performed to determine the characteristics of the synthesized samples. The use of amplifiers increases the catalyst activity and makes it more stable.

**Keywords:** Catalyst, Reforming, Methane, Hydrogen, Microchannel Reactor.

# Investigation of the Effect of Marangoni Flow and Molecular Arrangement on the Stability of Nanoparticle-stabilized Foam- An Experimental Study

**Fateme Reisi[1], Maryam Khosravi[2]*, Behzad Rostami[1], Hamid Vatanparast[2] and Alireza Fathollahi[1]**

1. Institute of Petroleum Engineering, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

2. Petroleum Engineering Research Division, Faculty of Research and Development in Upstream Petroleum Industry (FRDUPI), Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

**khosravim@ripi.ir**

**DOI:10.22078/PR.2022.4686.3105**

Received: December/25/2021 Accepted: May/08/2022

## Abstract

The main purpose of this study is to determine the molecular arrangement in lamella and the role of Marangoni convection in foam stability in the presence of nanoparticles. Experiments were conducted in two different foam systems of (1) anionic nanoparticles-cationic surfactant (CTAB) and (2) anionic nanoparticles-anionic surfactant (SDS). Observations showed that the effective mechanisms of stability are different. Although nanoparticles increase the stability of both foam systems, the presence of nanoparticles in the like-charge system improves foamability. In contrast, in the unlike-charge system, foamability decreases with the increment of nanoparticle concentration. The most influential factor in the foam stability in the like-charge case is the repulsive force which sends more surfactant molecules to the interface. Surface tension results demonstrate that Marangoni flow restitutes the negative impact of gravity drainage and increases the foam stability. In contrast, In the unlike-charge system, the presence of nanoparticles at the interface increases detachment energy significantly, and as a result, the stability boosts. The accumulation of nanoparticles in the interface changes it to a solid-like and high elasticity surface; thus, Marangoni flow is lost.

**Keywords:** Faom, Foam Stability, Foamability, Nanoparticles, Marangoni Flow, Molecular Arrangement.

Petroleum Research, 2022(October-November), Vol. 32, No. 125

# Effect of Viscosity Ratio of Injection Fluid and Reservoir Fluid on Prediction of Breakthrough Time Using Percolation Concepts

**Sara Shokrollahzadeh Behbahani, Mohsen Masihi* and Mohammad Hossein Ghazanfari**
Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
**masihi@sharif.edu**
**DOI:10.22078/PR.2022.4570.3060**

Received: July/31/2021 Accepted: February/23/2022

## Abstract

Estimation of the breakthrough time of injected fluid in water injection process is useful for process design and injection pattern during reservoir development. Conventional approach to this is to use reservoir simulation. An alternative is to use percolation theory approach. However, some of the assumptions used in developing the scaling function of breakthrough time such as similarity of viscosity of both injection and production fluids limits its applications to field scale. In this study, we use the dimensionless time approach for breakthrough which is based on a characteristic time. By using various reservoir simulation cases the effect of fluids viscosities was studied. The results showed that the suitable characteristic time for scaling of breakthrough time depends on both NTG and viscosity ratio of phases in a power law form with exponent of 1.3.

**Keywords:** Viscosity, Percolation, Breakthrough Time, Reservoir Porous Media.

PETROLEUM
RESEARCH
2022 (October-November)● Volume 32 ● No. 125

Contents:

PETROLEUM RESEARCH

2022(October-November) • Volume 32 • No. 125




***Director in Charge***: J. Towfighi
***Editor in Chief***: M. R. Ehsani
***Executive Manager:*** T. Moradian
***Assistant Editor***: F. Rahmani
***Administration Office***: N. Deldar, and P. N. Noori
***Publishing, Lithography, and Binding Company***: Ganjineh-ye Miniator Publisher

**Editorial Board**
***Aghabozorg H. R.,*** Professor at RIPI
***Bastani D.,*** Professor at Sharif University of Technology
***Ehsani M. R.,*** Professor at Isfahan University of Technology
***Ein-Mozaffari F.,*** Professor at Ryerson University
***Ghazanfari M. H.,*** Associate Professor at Sharif University of Technology
***Jafari Nasr M. R.,*** Professor at RIPI
***Jafari Behbahani T.,*** Associate Professor at RIPI
***Kadkhodaie Ilkhchi A.,*** Associate Professor at University of Tabriz
***Kamali M. R.,*** Professor at School of Engineering, Edith Cowan University, Australia
***Khamehchi E.,*** Professor at Amirkabir University of Technology
***Khorasheh F.,*** Professor at Sharif University of Technology
***Masihi M.,*** Professor at Sharif University of Technology
***Mehrvar M.,*** Professor at Ryerson University
***Moussavi Harami S. R.,*** Professor at Ferdowsi University of Mashhad
***Nasr Esfahany M.,*** Professor at Isfahan University of Technology
***Nekoomanesh M.,*** Professor at Iran Polymer & Petrochemical Institute
***Omidkhah M. R.,*** Professor at Tarbiat Modares University
***Rashidi F.,*** Professor at Amirkabir University of Technology
***Rashidi A.,*** Professor at RIPI
***Rezaee R.,*** Professor at Curtin University, Sydney
***Safekordi A. A.,*** Professor at Sharif University of Technology
***Towfighi J.,*** Professor at Tarbiat Modares University
***Vasheghani Farahani E.,*** Professor at Tarbiat Modares University
***Vosoughi Sh.,*** Professor at Kansas University, USA
***Vosoughi M.,*** Professor at Sharif University of Technology

**Advisory Board**

Aghabozorg H. R. (RIPI)
Aghli Gh. (Ferdowsi University of Mashhad)
Ayati B. (Tarbiat Modares University)
Eghbal Ahmadi M. H. (Tafresh University)
Ehsani M. R. (Isfahan University of Technology)
Fatemi S. M. (Sharif University of Technology)
Ghaedi M. (Shiraz University)
Ghazanfari M. H. (Sharif University of Technology)
Habibnia B. (Petroleum University of Technology)
Haghshenasfard M. (Isfahan University of Technology)
Kadkhodaei R. (University of Tabriz)
Khazali A. R. (Isfahan University of Technology)
Mahani H. (Sharif University of Technology)
Mahbobi A. (Ferdowsi University of Mashhad)
Movahed B. (CAPE)
Nasresfahani M. (Isfahan University of Technology)
Pishvaei M. R. (Sharif University of Technology)
Porkhalil M. (RIPI)
Rahmani M. (Ami Kabir University of Technology)
Rashidi A. M. (RIPI)
Rashidi F. (Ami Kabir University of Technology)
Saaeidi Dehahgani A. H. (Tarbiat Modares University)
Salehi M. A. (University of Isfahan)
Tahkhtravanchi M. (National Petrochemical Company)
Tayebi Sh. (RIPI)

**Address:**
Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)
P.O. Box: 14665-137, Tehran, Iran
Tel: (+98 21) 4825 2129, 4825 3263
Fax: (+98 21) 4473 9712
Website: www.ripi.ir